



Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"

Programa Interunidades



Mestrado

Engenharia Civil e Ambiental

ELIZÂNGELA DUTRA MARQUES

**INFLUÊNCIA DE RESÍDUOS DE CASCA DE ARROZ E ÓLEO DE
COZINHA NAS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DE BLOCOS
DE ADOBE COM SOLO SILTOSO**

Bauru
2023

ELIZÂNGELA DUTRA MARQUES

**INFLUÊNCIA DE RESÍDUOS DE CASCA DE ARROZ E ÓLEO DE
COZINHA NAS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DE BLOCOS
DE ADOBE COM SOLO SILTOSO**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Área de Concentração Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Gabbay de Souza

Bauru
2023



M357i

Marques, Elizângela Dutra

Influência de resíduos de casca de arroz nas propriedades físico-mecânicas de blocos de adobes com solo siltoso / Elizângela Dutra Marques. -- Bauru, 2023

64 f. : il., tabs., fotos

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, Bauru

Orientador: Ricardo Gabbay de Souza

1. Bloco de adobe. 2. Reaproveitamento de resíduos agrícolas. 3. Material de construção sustentável. 4. Casca de arroz. 5. Propriedades mecânicas. I. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE ELIZANGELA DUTRA MARQUES, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 06 dias do mês de outubro do ano de 2023, às 09:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de ELIZANGELA DUTRA MARQUES, intitulada **INFLUÊNCIA DE AGRO-RESÍDUOS NAS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DE BLOCOS DE ADOBE**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. RICARDO GABBAY DE SOUZA (Orientador(a) - Participação Presencial) do(a) Departamento de Engenharia Ambiental / Instituto de Ciência e Tecnologia Câmpus de São José dos Campos UNESP, Profª. Drª. FABIANA ALVES FIORE PINTO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Ambiental / Instituto de Ciência e Tecnologia Câmpus de São José dos Campos UNESP, Prof. Dr. RONAN CLEBER CONTRERA (Participação Virtual) do(a) Escola Politécnica / USP/São Paulo (SP). Após a exposição pela mestrande e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, a discente recebeu o conceito final: APROVADA. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. RICARDO GABBAY DE SOUZA



Assinado de forma
digital por Ricardo
Gabbay De
Souza:7055119723
4
Dados: 2023.10.06
16:19:38 +02'00'



PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO TÍTULO

A COMISSÃO EXAMINADORA PROPÕE A ALTERAÇÃO DO TÍTULO DO TRABALHO DA ALUNA
ELIZANGELA DUTRA MARQUES

DE: "INFLUÊNCIA DE AGRO-RESÍDUOS NAS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DE BLOCOS
DE ADOBE"

PARA:

INFLUÊNCIA DE RESÍDUOS DE CASCA DE ARROZ E ÓLEO DE COZINHA NAS PROPRIEDADES
FÍSICO-MECÂNICAS DE BLOCOS DE ADOBE COM SOLO SILTOSO

Bauru, 06 de outubro de 2023.

Prof. Dr. Ricardo Gabbay de Souza
Orientador

AGRADECIMENTOS

Neste momento, desejo manifestar os meus mais sinceros agradecimentos a todos aqueles que desempenharam um papel fundamental ao longo da trajetória que culminou nesta pesquisa, reconhecendo plenamente os desafios que se apresentaram.

Inicialmente, expresso a minha gratidão a Deus. Gostaria de estender a minha profunda apreciação à minha família pelo apoio oferecido. Agradeço igualmente ao Professor Ricardo Gabbay, meu orientador, pela orientação perspicaz e contribuições inestimáveis fornecidas ao longo deste percurso acadêmico.

Não posso deixar de reconhecer a instituição UNESP e todos os colaboradores que, por meio de suas contribuições, viabilizaram a concretização deste trabalho. Seja pela viabilização de recursos, infraestrutura ou inspiração intelectual, suas participações foram de inestimável valor.

A todos os mencionados e aqueles que, de alguma forma, influenciaram positivamente esta jornada, expresso o meu profundo reconhecimento. As suas contribuições foram peças fundamentais no quebra-cabeça desta pesquisa, e por isso, merecem a minha mais sincera gratidão.

RESUMO

Os tijolos de barro não queimados, conhecidos como blocos de adobe, são produzidos a partir de barro cru, secos ao ar livre e podem ser estabilizados com aditivos químicos. Geralmente, incorporam fibras naturais ou sintéticas e resíduos como agregados. A técnica de fabricação de adobe tem raízes históricas e pode ser uma alternativa mais sustentável em comparação com as técnicas contemporâneas. No entanto, trata-se de um tipo de construção vulnerável às intempéries, especialmente à água. A estabilização dessas estruturas é importante para o seu desempenho, uma vez que visa aprimorar determinadas propriedades mecânicas e físicas. O presente estudo tem como objetivo avaliar a influência da combinação de dois subprodutos (casca de arroz e óleo de cozinha usado) na estabilização dos blocos de adobe em relação às propriedades físicas e mecânicas. O estudo fundamentou-se em uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) e a fase experimental foi realizada no laboratório de mecânica dos solos da Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá (FEG), da Unesp, seguindo as Normas da ABNT correlatadas ao tema da pesquisa. Os testes de caracterização do solo indicaram que os parâmetros granulométricos estavam dentro dos limites mínimos necessários para a produção dos blocos de adobe, sem a necessidade de correção granulométrica. Para avaliar a utilização experimental dos resíduos na estabilização dos blocos de adobe, a casca de arroz foi empregada nas proporções (em relação ao peso do solo seco) de 0,3% e 0,6% combinadas com 1% de óleo de cozinha usado. Ainda foram testadas as mesmas proporções com 20% de areia. Os resultados obtidos não ficaram em conformidade com NBR 16814/2020 para blocos de adobe nos traços testados quanto à resistência à compressão. Observou-se que a composição contendo 0,3% de casca de arroz, combinada com 1% de óleo de cozinha usado, obteve o melhor valor de resistência à compressão após 120 dias de cura, registrando 0,83 MPa. Nos ensaios de absorção de água, a adição de óleo melhorou o desempenho em relação à absorção capilar, embora tenha reduzido a resistência mecânica. Os resultados mais favoráveis foram alcançados com uma taxa de absorção de 16% composta por 0,3% de casca de arroz, 1% de óleo de cozinha e 20% de areia na mistura. Além disso, a composição contendo 0,3% de casca de arroz, 1% de óleo de cozinha usado e sem adição areia apresentou uma taxa de absorção de 18,60% após 120 dias de cura, atendendo às diretrizes normativas. O estudo também demonstrou que a combinação de casca de arroz e óleo de cozinha usado melhorou simultaneamente as propriedades mecânicas e a absorção de água para esta composição. A proporção de 0,3% de casca de arroz resultou no aumento da aderência do material às partículas de argila presentes no solo, reduzindo a porosidade do bloco.

PALAVRAS-CHAVE: Bloco de adobe, Reaproveitamento de resíduos agrícolas, Material de construção sustentável, Casca de arroz, Propriedades mecânicas.

ABSTRACT

The unfired clay bricks, commonly referred to as adobe blocks, are produced from raw clay, air-dried, and can be stabilized with chemical additives. Typically, they incorporate natural or synthetic fibers and waste materials as aggregates. The manufacturing technique of adobe historical origins and can serve as a potentially more sustainable alternative compared to contemporary methods. However, it represents a construction type vulnerable to environmental elements, particularly water. The stabilization of these structures holds significance for their performance, aiming to enhance specific mechanical and physical properties. The primary objective of this study is to evaluate the influence of the combination of two byproducts, namely rice husk and used cooking oil, on the stabilization of adobe blocks concerning their physical and mechanical properties. The study was based on a Systematic Literature Review (SLR), and the experimental phase was conducted in the soil mechanics laboratory of the Faculty of Engineering and Sciences of Guaratinguetá (FEG), Unesp, following the ABNT standards related to the research topic. Soil characterization tests indicated that the granulometric parameters were within the required minimum limits for adobe block production, eliminating the need for granulometric correction. To evaluate the experimental use of waste in stabilizing adobe blocks, rice husk was used in proportions (in relation to the weight of dry soil) of 0.3% and 0.6% combined with 1% used cooking oil. The same proportions were also tested with 20% sand. The results obtained did not comply with NBR 16814/2020 for adobe blocks in the traits tested for resistance to specificity. It should be noted that the composition containing 0.3% rice husk, combined with 1% used cooking oil, obtained the best selection resistance value after 120 days of curing, recording 0.83 MPa. In water absorption tests, the addition of oil improved performance in relation to capillary absorption, although it reduced mechanical resistance. The most developed results were achieved with an absorption rate of 16% consisting of 0.3% rice husk, 1% cooking oil and 20% sand in the mixture. Furthermore, the composition containing 0.3% rice husk, 1% used cooking oil and no added sand showed an absorption rate of 18.60% after 120 days of curing, meeting regulatory guidelines. The study also demonstrated that the combination of rice husk and cooking oil used simultaneously improved the mechanical properties and water absorption for this composition. The proportion of 0.3% rice husk obtained increases the adhesion of the material to the clay particles present in the soil, reducing the porosity of the block.

KEYWORDS: adobe block, upcycling of agricultural waste, Sustainable building material, Rice husk, Mechanical properties.

Índice de Figuras

Figura 1- Diferenças entre os termos reciclagem e <i>upcycling</i>	6
Figura 2 - Produtos agrícolas do Brasil e os resíduos gerados	9
Figura 3 - Edifício de tijolo de adobe	12
Figura 4 - Processo de fabricação de adobe.....	12
Figura 5 - Tipos de estabilização de construção com terra.....	13
Figura 6 - Metodologia da Pesquisa	16
Figura 7. Detalhamento do programa experimental	18
Figura 8 - Coleta de solo e preparo de amostras para ensaio de caracterização	19
Figura 9 - Ensaio de granulometria por peneiramento grosso	22
Figura 10 - Ensaio de granulometria por sedimentação e peneiramento fino	22
Figura 11 - Ensaio do limite de liquidez.....	24
Figura 12 - Sequência do ensaio de limite de plasticidade	25
Figura 13 - Classificação da plasticidade do solo no sistema britânico	27
Figura 14 - Molde para modelagem dos blocos de adobe	30
Figura 15 - Preparo do solo para produção dos blocos de adobe	30
Figura 16 - Materiais utilizados para a produção dos blocos de adobe	31
Figura 17 - Mistura e moldagem dos blocos de adobe	31
Figura 18 - Betoneira utilizada na mistura dos traços	32
Figura 19 - Processo de cura e armazenagem dos adobes	32
Figura 20 – Ensaio para determinação das características dimensionais.....	34
Figura 21 - Recorte cúbico do corpo de prova	34
Figura 22 - Corte dos corpos de prova.....	35
Figura 23 - Processo de capeamento dos corpos de prova	35
Figura 24 - Dimensões da ruptura do corpo de prova	36
Figura 25 - Ensaio de resistência mecânica	36
Figura 26 – Ensaio de absorção de água.....	37
Figura 27 - Limite de liquidez do solo (LL)	39
Figura 28 - Curva granulométrica do solo	42
Figura 29 - Resistência à compressão aos 28 dias	49
Figura 30 - Resistência à compressão dos blocos aos 60 dias de cura	50
Figura 31 - Resistência à compressão aos 120 dias de cura	52
Figura 32 - Resistência à compressão dos blocos aos 28, 60 e 120 dias de cura	52

Figura 33 - Resumo dos valores de absorção de água dos blocos	54
Figura 34 - Gráfico dos resultados de f_{cak} e absorção de água dos blocos.....	55
Figura 35 - Análise da microestrutura do bloco de adobe de traço 1	55
Figura 36 - Análise de microestrutura do bloco de adobe de traço 2	56
Figura 37 - Análise de microestrutura do bloco de adobe do traço 3	56

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Composição química, em % M/M da casca de arroz	11
Tabela 2 - Classificação do limite de plasticidade do solo	27
Tabela 3 - Classificação do solo de acordo com a plasticidade.....	27
Tabela 4 - Traços dos blocos de adobe estudados	29
Tabela 5 - Dados obtidos nos ensaios de limite de liquidez do solo (LL).....	39
Tabela 6 - Dados para determinação do limite de plasticidade	40
Tabela 7 - Dados para determinação do teor de umidade do solo (continua).....	40
Tabela 8 - Resumo dos resultados obtidos para os Limites de Consistência.....	41
Tabela 9 - Distribuição granulométrica do solo	42
Tabela 10 - Características dimensionais aos 28 dias (continua)	43
Tabela 11- Características dimensionais aos 60 dias (continua)	45
Tabela 12 - Características dimensionais aos 120 dias (continua)	46
Tabela 13 - Resistência à compressão dos blocos aos 28 dias de cura.....	48
Tabela 14 - Resistência à compressão dos blocos aos 60 dias de cura.....	50
Tabela 15 - Resistência à compressão dos blocos aos 120 dias de cura.....	51

Índice de Quadros

Quadro 1 - Normas utilizadas na fase experimental	18
Quadro 2 - Modelo utilizado para cálculo do limite de liquidez	25
Quadro 3 - Modelo de quadro utilizado para cálculo de teor de umidade	26

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.2	OBJETIVOS	2
1.2.1	Objetivo geral.....	2
1.2.2	Objetivos específicos	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1	ECONOMIA CIRCULAR, RECICLAGEM E <i>UPCYCLING</i>	3
2.1.1	Economia Circular.....	3
2.1.2	Reciclagem e Upcycling.....	4
2.2	TECNOLOGIAS SUSTENTÁVEIS NA CONSTRUÇÃO CIVIL	7
2.2.1	Utilização de resíduos agrícolas na produção de materiais de construção.....	7
2.3	RESÍDUOS AGRÍCOLAS NO BRASIL	9
2.3.1	Resíduos da casca de arroz.....	10
2.4	ADOBE	11
2.4.1	Técnica de fabricação do bloco de adobe.....	12
2.4.2	Estabilização de construções com terra bruta.....	13
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	15
3.1	OBJETO DE ESTUDO	15
3.2	MÉTODO DE PESQUISA	15
3.2.1	Elaboração do Plano Experimental	17
3.3	MATERIAIS EMPREGADOS	19
3.3.1	Solo	19
3.3.2	Determinação do limite de plasticidade (LP)	25
3.3.3	Resíduo de casca de arroz e óleo de cozinha usado	28
3.3.4	Preparação da água para produção do adobe.....	28
3.4	PROCEDIMENTO PARA PRODUÇÃO DO ADOBE	28
3.4.1	Preparação de traços e dosagens	28
3.4.2	Preparação dos moldes para produção do blocos de adobe.....	29
3.4.3	Produção do bloco de adobe.....	30
3.5	PROCEDIMENTO PARA OS ENSAIOS COM OS BLOCOS DE ADOBE.....	33
3.5.1	Caracterização dimensional dos blocos de adobe	33
3.5.2	Procedimento para ensaio de resistência à compressão.....	34
3.5.3	Ensaio de absorção de água.....	37
3.5.4	Análise da Microestrutura	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	39

4.1	CARACTERIZAÇÃO DO SOLO	39
4.1.1	Limite de Liquidez do solo (LL)	39
4.1.2	Limite de Plasticidade do solo (LP)	40
4.1.3	Teor de Umidade do Solo.....	40
4.1.4	Análise granulométrica do solo	42
4.2	ENSAIOS COM OS BLOCOS DE ADOBE	43
4.2.1	Ensaio de características dimensionais.....	43
4.2.2	Ensaio de resistência a compressão simples.....	48
4.2.3	Absorção de água dos blocos de adobe	53
4.2.4	Análise Microestrutural.....	55
5	CONCLUSÕES	57
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

1 INTRODUÇÃO

O tijolo de terra crua, conhecido como bloco de adobe, é um dos materiais de construção civil mais antigos do mundo, cuja composição basicamente leva terra crua e água e em alguns casos palha ou fibras naturais (Torgal, 2009). A terra como material construtivo é empregada desde a pré-história e está em uso em todos os continentes por ser um material largamente disponível, acessível, reciclável e sustentável. Seu uso também oferece benefícios ambientais como a redução de energia nos processos construtivos e a diminuição das emissões de gases de efeito estufa. Além disso, traz vantagens para saúde e bem-estar dos ocupantes devido ao controle de temperatura dentro dos edifícios (Bayizitlioğlu, 2017).

Com a evolução das técnicas de arquitetura, estes métodos de construção foram caindo em desuso e substituídos por outros materiais de construção ditos modernos ou convencionais, tais como tijolos de barro cozido e materiais cimentícios (Torgal, 2009). Atualmente, o que se observa é um resgate desse material aos processos construtivos, com a vantagem de ser ecológico, sustentável, de baixo custo e com facilidade de obtenção da matéria-prima (Velasco-Aquino et al., 2020). Esse tipo de construção torna-se uma alternativa viável e sustentável pela sua disponibilidade, uma vez que une a viabilidade técnica à econômica sem esquecer o respeito ao meio ambiente. Além disso, as construções com adobe apresentam-se como opção ao déficit habitacional que atinge diversas populações ao redor do mundo (Danso et al., 2015).

No contexto das construções em terra, destaca-se, no âmbito brasileiro, a introdução das principais técnicas que abrangem a taipa de pilão, caracterizada por paredes sólidas de terra comprimida em camadas sucessivas, o bloco de adobe, compreendendo um tijolo de barro frequentemente incorporados com palha, bem como a taipa de mão, constituída por paredes de barro que são ancoradas por meio de vigas e pilares de madeira (ABNT, 2020).

Uma desvantagem dos blocos de adobe é a sua durabilidade, que pode estar associada a diversos fatores que incluem o uso de solo inadequado e de materiais inapropriados na composição. Isso diminui a vida útil da construção, principalmente do bloco em contato com a água, que pode se deteriorar com o passar do tempo (Eires; Camões; Jalali, 2017). Diversas técnicas têm sido avaliadas para a estabilização do bloco de adobe e outros tipos de construção com terra bruta, visando mitigar as propriedades de resistência mecânica e corrosão, entre outras características do solo, tornando-o mais seguro para a construção (Ige; Danso, 2022).

Os desafios ambientais como a redução do uso de novas matérias primas, da geração de resíduos e o gasto energético na produção de materiais de construção incitam a valorizar os

materiais locais e o uso de resíduos agrícolas. Alguns resíduos agrícolas como palhas, fibras, cascas conferem uma melhoria significativa nas propriedades mecânicas e térmicas dos adobes, e podem ser uma estratégia para agregar valor ao resíduo descartado (Oskouei; Mohammad; Madadipour, 2017).

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos desta pesquisa foram divididos em objetivo geral e específicos e encontram-se descritos a seguir.

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa foi avaliar a influência da casca de arroz e do óleo de cozinha usado nas propriedades físico-mecânicas de blocos de adobe.

1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar o solo local para avaliar seu potencial na produção de blocos de adobe seguindo a metodologia descrita na NBR 16814/2020;
- Avaliar o efeito das proporções de casca de arroz nas propriedades físico-mecânicas de blocos de adobe, combinadas com o uso de óleo vegetal como aditivo.
- Avaliar o impacto da interação entre a fração de argila do solo, as cascas de arroz e o óleo vegetal no preenchimento dos poros ou vazios no bloco de adobe, e como essa interação influencia a capacidade de absorção de água e resistência mecânica do bloco.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo descreve os dados compilados pela revisão sistemática da literatura, conforme as etapas descritas detalhadamente na seção metodológica. A revisão traz um panorama atual dos conceitos sobre a economia circular, a reciclagem e o *upcycling*, relacionando os conceitos entre si. Ainda nesta seção, são abordadas tecnologias sustentáveis na construção civil, materiais feitos a partir de resíduos agrícolas, resíduos agrícolas no Brasil e a casca de arroz, resíduo o qual foi empregado neste trabalho. Na seção subsequente é realizada uma abordagem conceitual sobre o tijolo de adobe e a variedade de materiais apontados pela literatura para a estabilização, ressaltando o reaproveitamento de uma diversidade de resíduos agroindustriais, bem como suas principais vantagens em relação às melhorias nas propriedades físicas e mecânicas dos blocos de adobe.

2.1 ECONOMIA CIRCULAR, RECICLAGEM E *UPCYCLING*

Projeções mostram que em 2030 a população mundial chegará a 9 bilhões de habitantes, o que significa que haverá um aumento significativo no uso de recursos e, consequentemente, uma ampliação da geração de resíduos (Weetman, 2019). As perspectivas relacionadas a essas questões ambientais, sobre o uso de recursos e seu reaproveitamento, são abordadas nas subseções e trazem os conceitos de economia circular, reciclagem e *upcycling*, com o objetivo de associá-los ao contexto da sustentabilidade e seguir um novo modelo de valorização de resíduos.

2.1.1 Economia Circular

Nos últimos anos, a economia circular vem se popularizando cada vez mais e seus principais elementos estão baseados em fluxos contínuos de materiais e energia, ampliando o ciclo de vida do produto e prolongando seu uso, segundo Ellen MacArthur Foundation (EMF), 2015. Na economia atual (linear) há uma grande demanda por recursos naturais para fabricação de novos produtos, que após o seu uso são descartados sem utilização total do seu potencial. A fim de propor uma mudança de pensamento surge a economia circular, na qual os produtos são descartados somente em sua última fase de vida, quando se esgotam todas as possibilidades de uso (Anastasiades et al., 2020).

Na Economia Circular (EC), o objetivo é priorizar os recursos de forma regenerativa, preservando e ampliando o que já existe (EMF, 2015). Isso envolve manter os produtos em uso, atualizando e reparando sempre que possível, e aproveitando os resíduos como recurso (Anastasiades et al., 2020). O produto deve ser utilizado e reutilizado indefinidamente, e todo seu ciclo de vida deve ser pensado, projetado e otimizado, para que ao final possa ter um fluxo de desmontagem e reutilização (EMF, 2015). Além disso, deve-se considerar o uso de energia renovável e evitar substâncias tóxicas na fabricação, permitindo a reciclagem de produtos pós-consumo e evitando danos ambientais (Contreras-Lisperguer et al., 2021).

A economia circular vai além da produção e consumo de bens; busca uma renovação capital, social e natural (EMF, 2015). O conceito tem suas bases em sistemas não lineares, sistemas vivos, baseados na inteligência da natureza, que vêm do termo “*cradle to cradle*” (do berço ao berço), onde o resíduo serve de insumo para novos produtos (Singh et al., 2019). Isso faz com que o material possa permanecer o maior tempo possível na economia, e ao chegar ao fim de seu ciclo de vida ainda ser compartilhado ou virar material de *upcycling* (reaproveitado, reformado, remanufaturado); só então deve seguir para reciclagem (Singh et al., 2019).

Porém, o que se observa nas alternativas de reciclagem é que os bens de consumo não têm sido projetados com este propósito. A economia circular vem com o propósito de desconstruir o conceito de resíduo, com a melhoria de projetos e sistemas que valorizem materiais naturais que podem ser totalmente recuperados (EMF, 2015). Dessa forma, o resíduo pode ser um recurso de maior valor, com potencial de entrar na cadeia ou ciclo novamente como novo material (Horodytska; Kiritsis; Fullana, 2020).

Aproveitar o resíduo de forma eficiente torna o processo produtivo menos dependente de novos recursos, possibilitando que tenha um fluxo cíclico e seja reaproveitado até o fim da vida útil (EMF, 2015). Uma vez que o material não é reutilizado ou reciclado, as perdas não são apenas ambientais; o seu ciclo de vida útil fica comprometido, trazendo prejuízos à economia e o resíduo perde seu valor (Blank et al., 2020). Por isso, para que os processos de reciclagem e reutilização sejam viáveis economicamente, é necessário que o resíduo tenha valor agregado e traga benefícios para indústria (Aliakbari et al., 2021).

2.1.2 Reciclagem e Upcycling

Segundo a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), a reciclagem é “ato ou ação de transformar resíduos sólidos em novos produtos, ou novas matérias-primas, a partir de mudanças em suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas”. Trata-se de

reaproveitar os resíduos ou materiais já sem utilidade, recuperá-los e transformá-los novamente em matéria-prima ou insumos para novos produtos (Brasil, 2010).

Nesse processo, os materiais ou resíduos podem ser utilizados na produção de itens semelhantes, ou idênticos, como garrafas de vidro e latas de alumínio (ciclo fechado). Em outras ocasiões os materiais reciclados são utilizados para produtos novos (ciclo aberto). Um exemplo são as garrafas plásticas, que podem ser transformadas tanto em garrafas novamente como em outros produtos como mangueiras e roupas. Em outras ocasiões há recuperação de compostos químicos (Davis; Masten, 2016).

O artigo 9º da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) estabelece uma ordem de prioridade a ser observada na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos. Essa orientação visa orientar as práticas sustentáveis e eficientes para lidar com os resíduos, promovendo a sustentabilidade ambiental. Se não for possível evitar, reduzir ou reutilizar, a reciclagem é a próxima opção, envolvendo o processo de transformação de resíduos em novos ou materiais. Quando as opções anteriores não são aplicáveis, o tratamento dos resíduos sólidos é considerado, incluindo processos que visam reduzir a nocividade dos resíduos. Por fim a disposição final é adequada apenas para rejeito, ou seja, resíduos que não podem ser recuperados ou tratados de maneira ambientalmente adequada (Brasil, 2010).

Além disso, no âmbito da Economia Circular (EC) e em conformidade com os 4R's (Reduzir, Reutilizar, Recuperar e Reciclar) propostos pela União Europeia (UE), a reciclagem é identificada como a etapa final para a eliminação (Anastasiades et al., 2020). Além disso, no contexto da EC e segundo os 4R's (Reduzir, Reutilizar, Recuperar e Reciclar) propostos pela União Europeia (UE), a reciclagem é a etapa final para o resíduo (Anastasiades et al., 2020). Em ambos os contextos a reutilização é o primeiro processo pelo qual o resíduo deve passar, antes de seguir para reciclagem.

Uma forma de reutilização de resíduos é o *upcycling*, onde os produtos são reaproveitados na mesma forma que seriam descartados, sem alterações ou com modificações mínimas, transformando-os em produtos novos, de boa qualidade, com novos usos e aplicações (Bridgens et al., 2018). O termo *upcycling* é uma tendência que surge com a urgência de preocupação ambiental aliada ao uso eficiente dos recursos (Singh et al., 2019). O *upcycling* é considerado uma prática dentro da economia circular, favorecendo que os materiais tenham fluxos circulares (Singh et al., 2019) e vem com desafio de reaproveitar materiais provenientes da reciclagem e reintroduzi-los no mercado com valores agregados, possibilitando que o resíduo possa ter uma segunda vida útil (Baiani; Altamura, 2018).

O termo *upcycling* pode ter surgido a partir de uma necessidade premente; por exemplo, em um cenário em que uma família possuía recursos limitados, eles recorriam à reutilização de materiais retirados do lixo para construir sua moradia, além disso, o *upcycling* pode ser impulsionado pelo aspecto criativo, na confecção de artesanato ou objetos decorativos (Bridgens et al., 2018). No século passado, as famílias tinham poucos recursos; os bens ou produtos eram utilizados até seu limite de vida útil, reparados e reutilizados diversas vezes, e só então descartados (Bridgens et al., 2018). É possível observar que o conceito de *upcycling* tem várias abordagens na literatura, sendo discutido tanto por acadêmicos quanto por empreendedores criativos e indústrias. Em todas essas perspectivas, destaca-se a conexão do *upcycling* com práticas sustentáveis (Singh et al., 2019).

No *upcycling*, é possível revitalizar produtos usados por meio de desmontagem, limpeza, reparo ou substituição de peças danificadas, resultando em um produto de qualidade semelhante a um novo. As práticas de *upcycling* visam dar uma nova utilidade a materiais descartados ou considerados sem utilidade, criando novos itens de maior valor agregado (Singh et al., 2019; Horodytska; Kiritsis; Fullana, 2020).

Apesar de terem semelhanças, a reciclagem e o *upcycling* diferem na maneira como convertem resíduos em materiais reutilizáveis. Enquanto o *upcycling* faz alterações mínimas no material, a reciclagem promove transformações de propriedades físicas, químicas ou biológicas. Ambos os processos, no entanto, contribuem para prolongar o ciclo de vida do produto (Contreras-Lisperguer et al., 2021). A Figura 1 demonstra as diferenças entre os termos reciclagem e *upcycling*.



Fonte: Autora

2.2 TECNOLOGIAS SUSTENTÁVEIS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A quantidade de Resíduos da Construção Civil (RCC) gerados nos canteiros de obras e demolições varia conforme a tecnologia construtiva, e depende do aquecimento da economia do país. A reutilização de resíduos como materiais construtivos pode ser uma opção tanto na redução dos impactos ambientais, quanto na diminuição da exploração de recursos naturais pelo setor construtivo (Alnahhal et al., 2021).

Um aspecto importante do uso desses resíduos é a grande variedade de materiais, os quais podem ter bom desempenho e permitir diminuição dos custos (Bamigboye et al., 2021). Diversas alternativas de reciclagem de RCC vêm sendo utilizadas na construção civil, como o uso de agregados graúdos e finos reciclados na formulação do concreto, resultando em um concreto mais sustentável, que ainda pode receber uma quantidade menor de outros resíduos, como fibras naturais e pó de vidro (Gebremariam et al., 2021). Outros materiais, como concretos reciclados, resíduos de cerâmicas e azulejos, podem ainda ser reaproveitados para produção de blocos (Tang et al., 2020).

Uma opção viável e sustentável para alguns resíduos descartados durante as construções, como resíduo de lã mineral, vidro, madeiras, papelão, é o uso na fabricação de alguns compósitos (Sormunen; Kärki, 2019). Por exemplo, a lã mineral, que é frequentemente utilizada em isolamento térmico em edifícios, é considerada um material não reciclável e acaba sendo enviada para os aterros, causando danos ambientais. Uma possível solução para esse resíduo seria sua reutilização em cerâmicas, cimentos, compósitos e telhas, pois possui boas propriedades pozolânicas, além de propriedades térmicas (Sormunen; Kärki, 2019).

Diversos estudos vêm sendo realizados para reduzir a dependência do Cimento Portland e as emissões de CO₂. Dentre as alternativas estão o uso de cinzas da indústria do óleo de palma e da casca do arroz, que estão sendo amplamente pesquisadas. Além de apresentarem propriedades pozolânicas, estas cinzas também apresentam alto teor de sílica, com grandes possibilidades de substituir parcial ou totalmente o cimento em concretos geopoliméricos (Alnahhal et al., 2021). Essas cinzas formam um concreto menos denso, devido às propriedades pozolânicas, deixando-os mais leve e com boa durabilidade (Alnahhal et al., 2021).

2.2.1 Utilização de resíduos agrícolas na produção de materiais de construção

A procura por materiais que sejam viáveis do ponto de vista econômico e que atendam às necessidades ambientais é uma tendência mundial (Moayed et al., 2019). Materiais de

origem biológica obtidos a partir de resíduos agrícolas oferecem uma ampla gama de opções para a produção de itens sustentáveis, eficientes e competitivos em relação aos derivados do petróleo (Battegazzore et al., 2018). Evidências apontam que as fibras vegetais são um reforço importante em alguns compósitos, principalmente por apresentarem celulose na composição e serem um polímero natural (Moayedi et al., 2019). Tanto as fibras naturais como os subprodutos agrícolas apresentam características sustentáveis e vantagens ambientais, pois elas podem ser uma oportunidade para o reaproveitamento do resíduo e ainda agregar valor a eles (Marques et al., 2019; Moayedi et al., 2019).

Estudos conduzidos na Índia mostraram uma variedade de materiais que podem ser utilizados a partir de resíduos agroindustriais, tais como: talos de algodão, cacho de banana, casca de milho, sementes de azeitonas, casca de coco, entre outros. Estes resíduos foram empregados na produção de placas térmicas e apresentaram boas propriedades (Madurwar; Ralegaonkar; Mandavgane, 2013).

Os resíduos derivados do milho, como sabugo e a casca, ainda são subutilizados como matéria prima, apesar de possuírem potencial para serem empregados na produção de painéis térmicos. Ao aproveitar esses resíduos nessa aplicação, não só se proporciona uma segunda vida a eles, mas também se promove um aproveitamento mais eficiente, aumentando o seu valor agregado (Ramos et al., 2021). A espiga de milho, por exemplo, pode ser comparada com Poliestireno Extrudado (XPS) na microestrutura e composição química (Moayedi et al., 2019). A adição de materiais como palhas, casca de arroz, madeira e cânhamo em argamassas como elementos de compósito em cimentos proporciona boas condições acústicas e térmicas. Além disso, resíduos como cavaco de madeira e as bio-resinas também apresentam desempenho térmico semelhante ao das cascas de arroz (Marques et al., 2019).

Embora parte das opções sustentáveis de materiais de construção se concentre na produção de placas ou painéis, a utilização de resíduos agroindustriais na fabricação de tijolos pode oferecer benefícios significativos, tais como a redução da carga permanente devido ao aumento de densidade, além de ser uma opção de construção de baixo custo (Rautray et al., 2019).

A produção de bio-tijolos a partir de agro-resíduos segue geralmente um processo que envolve a seleção cuidadosa do material, sua trituração e mistura com argila ou pó de pedra, juntamente com um aglutinante à base de cal. Após aproximadamente 30 dias de secagem natural, os tijolos adquirem uma resistência mecânica satisfatória, alcançando valores superiores a 2,0 MPa, que variam de acordo com o tipo de resíduo utilizado (Rautray et al., 2019). Esses valores estão acima da resistência mínima exigida pela ABNT NBR 15270-1/2017, para blocos não estruturais que é de 1,5 MPa (para tijolos de argila queimados ao forno).

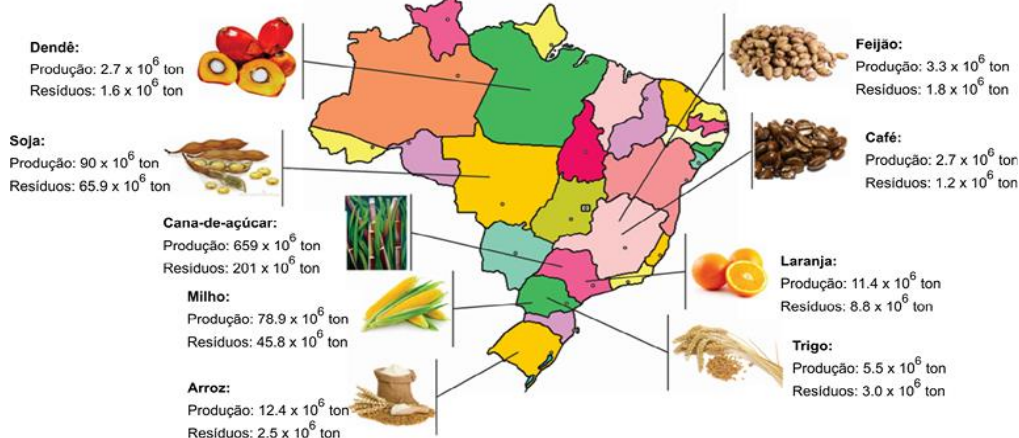
(ABNT, 2017). Os tijolos produzidos com agro-resíduos ainda possuem características de serem mais leves que os tijolos convencionais (barro cozido) e apresentam um bom desempenho térmico e acústico (Rautray et al., 2019).

2.3 RESÍDUOS AGRÍCOLAS NO BRASIL

Os resíduos provenientes das atividades agropecuárias, silviculturais e resíduos agroindustriais, chamados de RASP (resíduos agrossilvopastoris), abrangem diversos materiais, como palhas, cascas, serragens, resíduos agroindustriais de usinas de álcool, fábricas de suco, indústria de celulose, entre outros. De acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos – SINIR, estima-se que, em 2015 o Brasil tenha gerado 775 milhões de toneladas de RASP, com base nos índices de produção agropecuária e silvicultura (SINIR, 2023). Uma parte dos resíduos, como as palhas, permanece no campo e ajuda na recuperação do solo, enquanto a outra parte é destinada à geração de energia por meio da queima de biomassa (SINIR, 2023).

Para quantificar a quantidade de resíduos agrícolas é possível utilizar índices que estabelecem a relação entre a produção de cada tipo de cultura e a quantidade de resíduos resultante (Bellote et al., 2017). Para casca de arroz, por exemplo, estima-se que 30% do peso corresponda à casca, considerando a produção de arroz de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística -IBGE (IBGE, 2015). A Figura 2 ilustra alguns produtos agrícolas do Brasil e os resíduos gerados a partir deles, na safra de 2017.

Figura 2 - Produtos agrícolas do Brasil e os resíduos gerados



Fonte: Adaptado de Bellote et al. (2017)

O Brasil, além de ser um importante produtor agrícola, possui uma ampla diversidade vegetal em seu território, o que o torna um país com um grande potencial para aproveitar tanto as fibras vegetais quanto uma variedade de resíduos agrícolas na criação de compósitos e materiais de construção (Lopes et al., 2023).

De acordo com o IBGE, em 2015, foram produzidas quarenta mil toneladas de castanha do Brasil, das quais cerca de 1,4 mil toneladas correspondem a cascas, além de 6,7 milhões de toneladas cascas de coco (IBGE, 2023; Rambo et al., 2015). Isso demonstra o potencial de utilização desses resíduos, que podem ser reaproveitados em bioprodutos com alto valor agregado devido as suas características químicas lignocelulósicas (Rambo et al., 2015). As biomassas lignocelulósicas são as mais abundantes no setor agroindustrial e podem ser encontradas em diversas culturas, como palha de cevada, sabugo de milho, gramas, bagaço de cana-de-açúcar, casca de arroz, palha de trigo, madeira de eucalipto e outros resíduos vegetais (Vaz Júnior, 2020).

Os resíduos agrícolas geralmente são utilizados como combustível, mas também apresentam um potencial de serem reaproveitados em diversas outras fontes de matéria-prima, como produtos farmacêuticos, produtos químicos e materiais para várias aplicações, incluindo polímeros renováveis, plástico verde e outros (Bellote et al., 2017; Vaz Júnior, 2020).

Embora a geração de energia por meio da queima de biomassa vegetal seja considerada uma prática positiva, o gerenciamento ambiental das cinzas, um subproduto resultante desse processo, representa um desafio ambiental significativo (Lopes et al., 2023).

2.3.1 Resíduos da casca de arroz

As cascas de arroz são subprodutos do processo de beneficiamento do arroz e são comumente consideradas resíduos agrícolas. No Brasil, elas estão entre os resíduos agrícolas mais estudado pelos cientistas, ocupando o segundo lugar em termos de quantidade de resíduos, ficando atrás apenas do bagaço-de-açúcar (Rambo et al., 2015).

O Brasil ocupa a 9ª posição como o maior produtor de arroz do mundo, com uma produção anual de aproximadamente 10,7 milhões toneladas de arroz (IBGE, 2023). Após o beneficiamento, são geradas cerca de 3,21 milhões de toneladas de casca de arroz (cerca de 30% do peso) e as cinzas de arroz representam cerca de 25% de resíduo para cada 100 kg de casca queimada (Lopes et al., 2023). As cascas têm um grande potencial econômico, pois possuem diversas aplicações além da queima, podendo ser utilizadas na fabricação de materiais de construção e várias indústrias (Vaz Júnior, 2020).

2.3.1.1 Propriedades químicas da casca de arroz

A casca de arroz é composta principalmente por celulose, lignina, sílica e outros compostos orgânicos e inorgânicos. A composição pode variar dependendo da variedade e forma de cultivo. A celulose é o composto principal da casca de arroz, com 43,80%, a lignina, um polímero complexo, está presente em cerca de 24,60% e hemicelulose de 31,60%. A casca ainda tem um componente inorgânico importante que é a sílica, representando cerca de 15% a 20% (Vaz Júnior, 2020). A Tabela 1 apresenta a composição química em % M/M da casca de arroz.

Tabela 1 - Composição química, em % M/M da casca de arroz		
CELULOSE	HEMICELULOSE	LIGNINA
43,80	31,60	24,60

Fonte: Adaptado de Vaz Júnior (2020)

2.4 ADOBE

A palavra adobe é de origem árabe e significa tijolo seco ao sol. Os adobes são feitos de terra crua, secos ao sol e podem ser estabilizados com aditivos químicos ou não. Geralmente, utilizam fibras naturais ou sintéticas e resíduos ou subprodutos (Jamil et al., 2021). É uma técnica simples e pode ser realizada por qualquer pessoa, pois não requer habilidade complexa e ainda utiliza materiais disponíveis localmente, além de ser uma construção de baixo impacto ambiental e de o solo possuir características que o tornam um bom isolante térmico e acústico (Oskouei; Mohammad; Madadipour, 2017; Serrano; Barreneche; Cabeza, 2016).

Há milhares de anos, os adobes vêm sendo empregados em construções notáveis e sítios arqueológicos que ostentam imponentes edifícios em diversas partes do mundo (Aldawoodi; Sabri; Wis, 2022; Caporale et al., 2014). Eles podem ser confeccionados pela combinação de solo e água até alcançar uma textura plástica, possibilitando sua modelagem de acordo com as formas desejadas. Além disso, esse material também pode servir como reboco. Em muitas situações, acrescenta-se palha ao adobe com o intuito de minimizar a probabilidade de fissuras (Aldawoodi; Sabri; Wis, 2022).

A percepção da cultura de construção e a adoção de técnicas construtivas locais podem parecer um conceito ultrapassado, diante do papel da industrialização na construção civil. No entanto, ao optar por materiais locais e valorizar mão de obra local, é possível reduzir despesas com transportes, extração de matérias primas e emissões de gases do efeito estufa (Torgal, 2019). A Figura 3 ilustra uma construção em tijolo de adobe.

Figura 3 - Edifício de tijolo de adobe



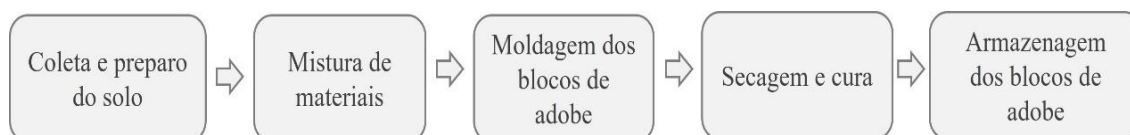
Fonte: Torgal (2019)

Apesar do adobe ser um material construtivo milenar, ele pode ser utilizado nos dias de hoje, adaptando-se ao contexto em que é inserido e as condições culturais e econômicas. Com melhorias, o adobe apresenta-se uma opção econômica e eficiente (Figueiredo et al., 2020). As necessidades atuais requerem o uso consciente de materiais, reutilização de resíduos e combinação de diferentes materiais que possam melhorar o desempenho da construção, viabilizando a técnica sob uma perspectiva da economia circular (Torgal, 2019).

2.4.1 Técnica de fabricação do bloco de adobe

Dos métodos construtivos utilizando terra crua, é o adobe a técnica mais simples e rápida para uma construção em alvenaria modular. O solo é seu principal componente e deve ter uma consistência plástica e argilosa (Figueiredo et al., 2020). A terra é misturada com água e colocada em um molde de madeira, geralmente retangular. Ainda frescos, os blocos de adobe são desmoldados e levados para secagem em temperatura ambiente (ABNT, 2020). A Figura 4 representa o processo simplificado da fabricação do adobe.

Figura 4 - Processo de fabricação de adobe



Fonte: Adaptado da ABNT (2020)

A argamassa de assentamento deve ser do mesmo material dos blocos de adobe, para que tenha mesmo nível de retração, e dessa forma evitar o aparecimento de fissuras na construção (Torgal, 2009; ABNT, 2020). A produção do adobe também pode ser otimizada

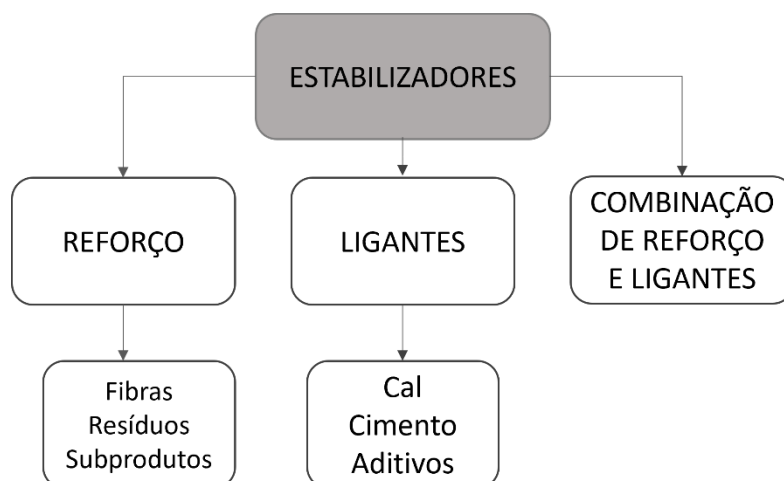
com o uso de máquinas garantindo maior precisão e padronização dos blocos (Figueiredo et al. 2021).

2.4.2 Estabilização de construções com terra bruta

Métodos construtivos como adobe, blocos de terra compactada (BTC) e a taipa seguem diversas técnicas e geralmente utilizam apenas solo e água. Essas construções de terra são conhecidas pela sua relativa vulnerabilidade em relação ao intemperismo e, mais especificamente, em relação à água (Calatan et al., 2017; Giroudon et al., 2019).

A estabilização dessas construções é um fator importante para o seu desempenho, uma vez que a função dos estabilizadores é melhorar algumas propriedades, tais como resistência mecânica e durabilidade (Losini et al., 2021). Os estabilizadores podem ser utilizados na forma de reforço ou apenas como ligantes e têm funcionalidades diferentes, conferindo melhoria a algumas propriedades dos blocos feitos com solos ou argilas (Danso et al., 2015; Losini et al., 2021). A combinação entre o reforço e os ligantes confere uma maior durabilidade aos blocos em relação à água, um dos principais problemas das construções de terra (Danso et al., 2015). Na Figura 5, apresenta-se um diagrama sobre a estabilização de construções com terra como o adobe, taipa e BTC.

Figura 5 - Tipos de estabilização de construção com terra



Fonte: Adaptado de Losini et al. (2021)

No caso do bloco de adobe, as fibras desempenham um papel fundamental como aditivo, atuando como reforço para aumentar a resistência à compressão do bloco. Por outro lado, os ligantes como a cal ou o cimento têm a função de melhorar as propriedades de resistência à

água e durabilidade do material (Danso et al., 2015; Losini et al., 2021). Embora a combinação de estabilizantes sintéticos (cal e cimento) favoreça uma melhoria nas propriedades dos blocos de adobe, há questões ambientais, pois o uso de alguns componentes, como o cimento, reduz a reciclabilidade do solo, uma vez que este uso transforma o solo em pedras artificiais (RCC classe A). Há ainda o aumento com despesas para fabricação do tijolo (Losini et al., 2021).

Além disso, algumas fibras também apresentam baixa resistência a fungos, visto que possuem características específicas que podem deteriorar a construção com o tempo (Laborel-Préneron et al., 2019). Atualmente, o uso de estabilizantes naturais ou biopolímeros de diversas fontes, tais como óleos, ceras e resinas, melhora as construções com terra em relação à resistência à água, pois estes possuem características capazes de alterar as cargas eletrostáticas da argila (forças de repulsão e atração entre as cargas) (Losini et al., 2021). Os óleos, ao reagirem com argila, causam um duplo efeito devido à sua insolubilidade em água; parte do óleo é absorvida por partículas da argila e outra parte fica na superfície da argila. Essa simultaneidade faz com que o material realize a troca de vapor d'água com o meio externo (Eires; Camões; Jalali, 2017).

Embora o uso de óleos ou gorduras em adobe seja um assunto pouco estudado, o óleo de linhaça e outros tipos de gorduras podem melhorar a resistência com relação a água quando misturados à cal, pois reagem e passam a ter propriedades tanto hidrofóbicas quanto hidrofílicas (repelente e absorção, respectivamente). Essas características são importantes para a durabilidade do bloco em relação à água (Eires et al.; Losini et al., 2021).

O desempenho dos blocos de adobe está diretamente relacionada com a matéria prima utilizada na estabilização. No caso da fibra de palma, é possível atingir uma resistência mecânica de até 16,93 MPa (Oskouei; Afzali; Madadipour, 2017). Já para os blocos com adição de fibras Neem, a resistência à compressão pode chegar até 6,35 MPa (Babé et al., 2021). Esses valores ficaram consideravelmente acima dos requisitos mínimos para resistência à compressão da Norma Americana ASTM que é de 2,68 MPa (Oskouei et al., 2017) e da Norma brasileira NBR 16814/2020 que é de 1,5 MPa (ABNT, 2020). Por outro lado, blocos com fibras de coco (0,5% em peso de solo) apresentaram uma resistência à compressão mais baixa, de 1,0 MPa (Oskouei et al., 2017).

3 MATERIAL E MÉTODOS

Para alcançar os objetivos propostos foram desenvolvidas as seguintes etapas: objeto de estudo, metodologia da pesquisa, que envolveu a revisão sistemática da literatura e elaboração do plano experimental, juntamente com os materiais empregados. Todas essas etapas encontram-se detalhadas nesta seção.

3.1 OBJETO DE ESTUDO

A região do Vale do Paranapanema, onde está localizado o município de Santa Cruz do Rio Pardo/SP, está a 343 km da Capital Paulista. Sua economia está voltada para o processo de beneficiamento de arroz, indústria calçadista, atividades agropecuárias e diversas atividades comerciais, além de usinas de álcool no entorno do município (Prefeitura Municipal de Santa Cruz do Rio Pardo/SP, 2021).

De acordo com dados coletados em empresas locais, a quantidade diária de arroz beneficiado no município é de aproximadamente 780 ton.dia⁻¹, das quais 23% são cascas (resíduos). No município, geralmente a casca de arroz é moída e vendida como mistura para fábricas de ração animal. Também é utilizada como biomassa para queima em caldeiras (Prefeitura Municipal de Santa Cruz do Rio Pardo/SP, 2021).

Segundo a empresa *Solito alimentos* o valor pago pelas cascas de arroz moídas é baixo e varia de acordo com sazonalidade e demanda do produto. O uso desse resíduo apresenta-se como alternativa para produção de um material sustentável como forma de agregar valor ao resíduo.

3.2 MÉTODO DE PESQUISA

A metodologia empregada neste estudo foi dividida em duas etapas principais. Inicialmente foram realizadas sete atividades para seleção do tema, com ênfase na identificação de evidências relevantes ao tema da pesquisa, por meio de uma revisão sistemática da literatura (RSL). Na etapa subsequente foi elaborado o plano experimental, que foi subdividido em 3 atividades. Essas atividades abrangeram a coleta e caracterização do solo, produção do bloco de adobe, além dos ensaios mecânicos, físicos e absorção de água. Todas as etapas do trabalho seguiram as normas técnicas brasileiras e todos os procedimentos são descritos nesta seção. A

Figura 6 apresenta um resumo visual das etapas da metodologia, e a seguir serão detalhados os procedimentos utilizados para realização deste trabalho.



Fonte: Autora

Este projeto fundamentou-se em uma revisão sistemática da literatura (RSL), que consistiu nas seguintes atividades: delimitação do tema (atividade I); definição dos termos de busca (atividade II); escolha da base científica (atividade III), análise de títulos e abstracts dos artigos (atividade IV); escolha de artigos aderentes ao tema da pesquisa (V); armazenagem dos artigos no Software Mendeley e eliminação de duplicidade de artigos (atividade VI); estudo e sistematização do conteúdo dos artigos (atividade VII).

A pesquisa bibliográfica concentrou-se na busca de estudos que abordaram o uso de agro-resíduos em blocos de adobe e construções com terra, e as palavras-chave utilizadas nas bases científicas foram:

- adobe OR "bio brick" OR "earth brick" OR "raw earth construction" OR "earthen masonry" OR "bio-based earth brick" OR "earth block" OR "mud brick" OR "earth buildings" (campo 1); AND

- "bio-waste" OR "organic waste" OR "organic fraction of municipal solid waste" OR "agricultural waste"; "bio-waste" OR "organic waste" OR "organic fraction of municipal solid waste" OR "agricultural waste" OR "organic fiber" OR "organic aggregate" OR "bio fiber" OR " bio aggregate" OR "rice husk" OR "coconut fiber" OR bagasse OR “sisal fiber waste” OR “agave fiber” OR corn OR straw OR “agro-industrial waste” (campo 2); AND NOT
- cement OR ash OR "synthetic fibers waste" OR "plastic waste" OR "geopolymer" OR polystyrene (campo 3).

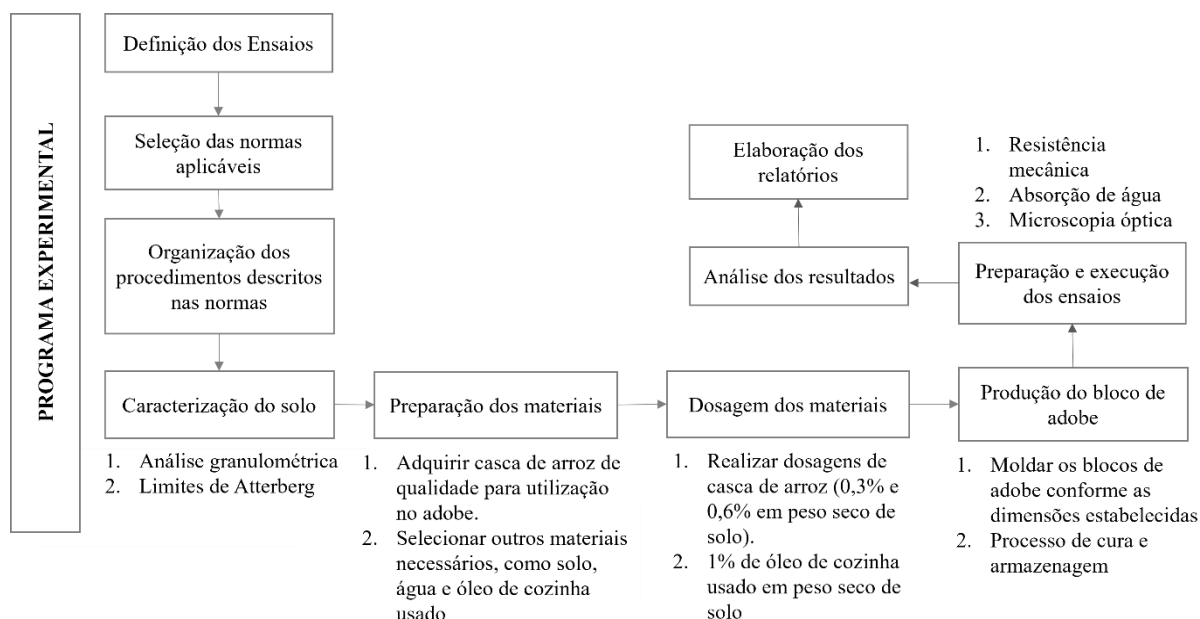
As bases científicas utilizadas na pesquisa foram a “Scopus” e a “Web of Science” e a pesquisa foi realizada em setembro de 2022. O critério utilizado para inclusão e exclusão dos artigos no estudo teve como base a leitura prévia dos títulos. Os estudos que apresentavam os termos relevantes à temática central da pesquisa seguiam para análise do abstract, buscando aprofundar o entendimento do tema e dando especial atenção ao objetivo, resultados e conclusões. Foi desconsiderado na pesquisa o uso de cinzas e aditivos que pudessem prejudicar a reciclabilidade do solo (cimentos, aditivos sintéticos e plásticos), e priorizados os estudos que envolviam o uso de materiais naturais (fibras, agregados orgânicos etc.), resíduos agroindustriais e uso de estabilizadores naturais tais como os biopolímeros. Os artigos coletados correspondem aos publicados nos últimos 10 anos.

Os artigos selecionados foram gerenciados no software Mendeley, visando otimizar o trabalho, organizar as referências bibliográficas e descartar duplicidades. Uma tabela foi elaborada no software Excel, contendo as principais características dos estudos, como os tipos de resíduos utilizados, composição dos blocos, ensaios realizados, métodos de pesquisas utilizados, resultados obtidos, lições da pesquisa e possíveis lacunas. Essa abordagem possibilitou uma análise mais detalhada dos artigos coletados.

3.2.1 Elaboração do Plano Experimental

O Experimento foi conduzido seguindo as seguintes etapas: definição dos ensaios a serem realizados (VIII), seleção das Normas aplicáveis (IX), estudo e organização dos procedimentos descritos nas Normas (X); preparação e execução dos ensaios (XI); análise dos resultados obtidos (XII) e elaboração de relatórios (XIII). A Figura 7 ilustra o detalhamento do programa experimental do trabalho.

Figura 7. Detalhamento do programa experimental



Fonte: Autora

Todas as fases experimentais foram conduzidas no laboratório de solos da Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá (FEG-UNESP), localizada na cidade de Guaratinguetá/SP. As Normas utilizadas para orientar a fase experimental deste trabalho estão listadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Normas utilizadas na fase experimental

ABNT NBR 16814/2020	Adobe - Requisitos e métodos de ensaios
ABNT NBR 6457/2016	Amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização
ABNT NBR 7181/2016	Solo – Análise granulométrica
ABNT NBR 6459/2016	Solo – Determinação do limite de liquidez
ABNT NBR 10836/2012	Bloco de solo cimento sem função estrutural – Análise dimensional, determinação de resistência à compressão e da absorção de água - método de ensaio
ABNT NBR 6502/2022	Solo -Terminologia
ABNT NBR 7180/2016	Solo – Determinação do limite de plasticidade

Fonte: Autora

3.3 MATERIAIS EMPREGADOS

Apresentam-se a seguir os materiais empregados para produção experimental do adobe, bem como os equipamentos utilizados nos ensaios físicos e ensaios mecânicos dos corpos de prova:

- Materiais: solo; água; resíduos de casca de arroz; óleo de cozinha usado.
- Equipamentos: balança de precisão; peneiras; misturador ou betoneira; fôrmas para moldagem dos blocos de adobe; dispositivo para ensaios de compressão axial; paquímetro e régua de precisão de 5,0 mm.

3.3.1 Solo

A principal matéria-prima utilizada para a produção do adobe foi o solo natural. O solo empregado na produção do adobe foi coletado nas proximidades do campus da UNESP - Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá - FEG. A coleta totalizou aproximadamente 250 kg de solo, que foram transportados para o laboratório. Uma amostra de cerca de 15 kg foi separada especificamente para os ensaios de caracterização física. A Figura 8 ilustra o processo de retirada de solo para os ensaios de caracterização e produção do bloco.

Figura 8 - Coleta de solo e preparo de amostras para ensaio de caracterização



Fonte: Autora

3.3.1.1 Preparo das amostras para ensaios de caracterização

A Norma utilizada como guia para o preparo das amostras de solo foi ABNT NBR 6457/2016, que estabelece os métodos necessários a serem utilizados nos ensaios de

compactação e caracterização – análise granulométrica, determinação dos limites de liquidez (LL), limites de plasticidade (LP), massa específica das partículas que passam na peneira 4,8 mm e teor de umidade do solo.

Para realizar os ensaios de caracterização, o solo coletado foi levado embalado até o laboratório para evitar perda de umidade. O solo foi utilizado sem secagem prévia. Os torrões foram desmanchados com cuidado para evitar quebra dos grãos, deixando a amostra uniforme.

Com o objetivo de determinar a quantidade de amostra necessária para o ensaio de análise granulométrica, foi realizada a passagem da amostra pela peneira de 76 mm, descartando o material retido e considerando apenas o que passou. Assim foram separados 8 kg de amostra para este ensaio.

Para determinação do limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP), foi utilizada uma quantidade de amostra de aproximadamente 200 g de solo seco. Antes do ensaio foram retirados manualmente raízes, gravetos e grãos mais grossos presentes na amostra. Para determinação do teor de umidade do solo, a quantidade de amostra utilizada foi de 300 g, levando em consideração o tamanho dos grãos.

3.3.1.2 Procedimento para determinação do teor de umidade

- a) inicialmente a quantidade de amostra, já determinada pelo tamanho dos grãos, foi destorroadada. O solo foi colocado em cápsulas metálicas, que foram pesadas vazias (M_3) antes de colocar a amostra. Depois foram fechadas e então pesou-se o conjunto (cápsulas, solo), e os valores foram registrados com a cápsula (M_1);
- b) na etapa seguinte removeu-se a tampa da cápsula e a amostra foi levada à estufa com temperatura de 105 °C até 110 °C por um período de 16 a 24 horas. A cápsula ficou sem a tampa durante o processo de secagem na estufa;
- c) após esse período, as cápsulas foram retiradas da estufa e deixadas em local fresco até atingir a temperatura ambiente;
- d) recolocou-se a tampa e pesou-se novamente as cápsulas, anotando (M_2), que é o peso seco da amostra mais o peso da cápsula.

Foram estabelecidos cinco valores de umidade por meio da aplicação da Equação 1.

Na qual:

w = Teor de umidade (%)

M_1 = Massa de solo úmido mais a massa do recipiente (g)

M_2 = Massa de solo seco mais massa a massa do recipiente (g)

M_3 = massa do recipiente (cápsula metálica) (g)

3.3.1.3 Análise granulométrica do solo

O ensaio de granulometria foi realizado por meio da combinação entre peneiramento e sedimentação com a finalidade de obter a curva granulométrica do solo, conforme a norma ABNT NBR 7181/2016. Os principais equipamentos e utensílios utilizados no ensaio foram: balança; almofariz e mão de grau; cápsulas para determinação de umidade; estufa; peneiras (50 mm; 38 mm; 25 mm; 19 mm; 9,5 mm; 4,8 mm; 2,4 mm; 1,2 mm; 0,6 mm; 0,42 mm; 0,30 mm; 0,15 mm; 0,075 mm); agitador de peneiras; dispersor elétrico; proveta de vidro com capacidade 252 cm³; proveta de vidro com traço de referência de 1000 cm³; densímetro graduado de bulbo simétrico; termômetro; relógio com indicação em segundos. Para realizar o ensaio foram seguidas as etapas seguintes:

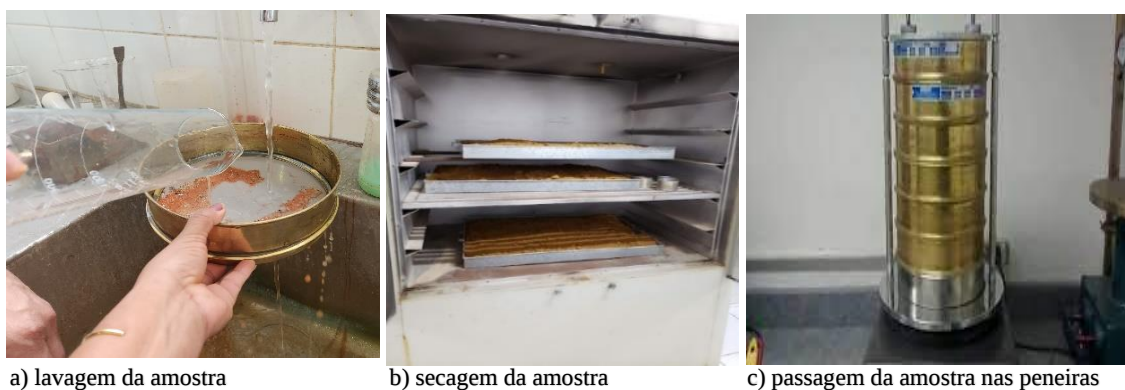
- 1) **peneiramento grosso:** Inicialmente a quantidade de amostra preparada conforme o item 3.3.1.1 foi submetida à peneira 2,0 mm. O material retido na peneira foi lavado em um tanque, utilizando água de baixa pressão para eliminar as partículas finas. Em seguida foi colocado na estufa a uma temperatura entre 105°C e 110° C para secagem. Com auxílio de um agitador mecânico a amostra foi passada nas seguintes peneiras: 50 mm; 38 mm; 25 mm; 19 mm; 9,5 mm; 4,8 mm e em cada peneira foram anotadas as massas retidas em gramas (g);
- 2) **sedimentação:** Tomou-se cerca de 100 g de material passado na peneira de 2,0 mm, determinou-se a massa com resolução de 0,01 g, registrando M_w (Massa seca), o material foi transferido para um béquer contendo uma solução defloculante de hexametáfosfato de sódio, com uma concentração de 45,7 g de sal por 1000 cm³ de solução. O béquer foi agitado e deixado em repouso por 12 horas. Após esse período, o material do béquer foi transferido para um dispersor e agitado por 15 minutos. Imediatamente após a agitação transferiu-se o material para uma proveta, registrando-se a hora exata do início da sedimentação. Em seguida o densímetro foi mergulhado na dispersão e então foram efetuadas as leituras nos tempos: 0,5 min; 1 min; 2 min; 4 min;

8 min; 15 min; 30 min; 1 h; 2 h; 4 h; 8 h; 24 h a contar do início da sedimentação. A temperatura foi observada e anotada a cada leitura. Após a última leitura, o conteúdo da proveta foi transferido para peneira de 0,075 mm e em seguida foi lavado novamente com água;

- 3) **peneiramento fino:** O material retido na peneira de 0,075 mm (resultante da sedimentação) foi levado à estufa para secagem a uma temperatura entre 105°C e 110°C até a constância de massa. Com auxílio do agitador mecânico passou-se nas peneiras menores de 1,2 mm; 0,6 mm; 0,42 mm; 0,30 mm; 0,15 mm; 0,075 mm. Os valores das massas retidas acumuladas foram registrados com resolução de 0,01g.

As Figuras 9 e 10 ilustram a sequência do ensaio de granulometria pela combinação de sedimentação e peneiramento.

Figura 9 - Ensaio de granulometria por peneiramento grosso



Fonte: Autora

Figura 10 - Ensaio de granulometria por sedimentação e peneiramento fino



Fonte: Autora

Os dados referentes aos ensaios são apresentados em um gráfico no capítulo de Resultados e Discussão, em que o eixo x representa o diâmetro das partículas em escala logarítmica e o eixo y representa as porcentagens de partículas que passam ou são retidas nas peneiras, em escala aritmética. Para determinar essas porcentagens nos ensaios de peneiramento e sedimentação foi utilizada a Equação 2 e a Equação 3.

$$M_s = \frac{(M_t - M_g)}{100 + w} \times 100 + M_g \quad (2)$$

Na qual:

M_s = Massa total da amostra seca

M_t = massa seca a temperatura ambiente

M_g = Massa do material seco que passa na peneira 2,0 mm

w = umidade higroscópica do material passado na peneira 2,0 mm

$$Q_f = \frac{M_w \times 100 - M_r (100 + w)}{M_w \times 100} \times N \quad (3)$$

Na qual:

Q_f = Porcentagem de materiais que passam nas peneiras (1,2 mm – 0,6 mm – 0,42 mm – 0,25 mm – 0,15 mm – 0,075 mm)

M_w = Material úmido submetido ao peneiramento fino ou sedimentação

M_r = Material retido em cada peneira

N = Porcentagem do material retido na peneira 2,0 mm

3.3.1.4 Determinação do Limite de Liquidez (LL)

Para execução deste ensaio, de acordo com NBR 6459/2016, uma amostra de solo de aproximadamente 100 g foi colocada em um recipiente de porcelana e adicionada água em pequenas quantidades. A massa foi revolvida e amassada até obter uma pasta homogênea, com consistência plástica. Essa consistência era necessária para que 35 golpes fossem capazes de fechar a ranhura feita com uma lâmina de aço na amostra.

Em seguida, a mistura foi transferida para a concha do aparelho Casagrande, sendo moldada com uma espátula para formar uma camada de solo no aparelho 10 mm de espessura no centro do aparelho. Com auxílio de um cinzel (lâmina de aço) foi feita um ranhura (fenda)

no meio da amostra, dividindo a massa do solo em duas partes. A manivela do aparelho foi utilizada para dar golpes na concha de baixo para cima, golpeando e permitindo que amostra caísse em queda livre. Durante o ensaio foram registrados o números de golpes necessários para fechar uma distância de 13 mm de comprimento de solo ao longo da ranhura, a fim de obter a amostra. Em seguida, uma pequena quantidade de material que se uniu nas bordas inferiores do aparelho foi colocada em uma cápsula metálica, para determinar o teor de umidade da amostra, seguindo os mesmos procedimentos do item 3.3.1.2 (procedimento para determinação de teor de umidade).

O restante do material foi transferido de volta para o recipiente de porcelana, onde foi novamente adicionada água e misturada. O ensaio foi repetido 5 vezes para se obter outros pontos de ensaio. O número de golpes foi obtido e registrado em cada ensaio. A Figura 11 ilustra a execução do ensaio para determinação do limite de liquidez (LL) e detalhe da ranhura.

Figura 11 - Ensaio do limite de liquidez



Fonte: Autora

Os dados coletados durante o ensaio foram apresentados em um gráfico, em que o eixo das ordenadas (y) representou o número de golpes em escala logarítmica e eixo das abscissas (x) representou os valores de teores de umidade em escala aritmética. Os valores foram ajustados por uma reta com os pontos obtidos correspondentes. O valor considerado para o limite de liquidez (LL) do solo foi obtido da reta com o teor de umidade correspondente a 25 golpes e expresso em porcentagem. O Quadro 2 foi utilizado para facilitar os cálculos para determinação do limite de liquidez.

Quadro 2 - Modelo utilizado para cálculo do limite de liquidez

Amostras (g)	1	2	3	4	5
Nº da cápsula					
Cápsula + solo + água (g)					
Cápsula + solo (g)					
Cápsula (g)					
Massa de água (g)					
Massa de Solo (g)					
Teor de umidade (%)					
Nº de Golpes					

Fonte: Adaptado da ABNT (2016)

3.3.2 Determinação do limite de plasticidade (LP)

O procedimento para determinar o limite de plasticidade (LP) teve como base a Norma ABNT NBR 7180/2016. Para realizar este ensaio foi utilizado metade da amostra preparada no item 3.3.1.1 (preparo da amostra), o que corresponde a aproximadamente 100 g de solo. A amostra foi colocada em um recipiente de porcelana, e com auxílio de uma espátula acrescentou-se água gradualmente até obter uma massa homogênea. Em seguida, cerca de 10 g dessa massa foram retiradas e moldadas em uma pequena bola. Essa bola foi rolada em cima de uma placa de vidro com a palma da mão até formar um cilindro e atingir as medidas 3 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento (conforme gabarito de alumínio disponibilizado no laboratório). Foram obtidas 5 amostras e levadas à estufa para determinar teor de umidade conforme NBR 6457/2016. A Figura 12 apresenta a sequência para determinação do limite de plasticidade.

Figura 12 - Sequência do ensaio de limite de plasticidade



Fonte: Adaptado de Manual Básico de Estradas e Rodovias Vicinais (2012)

Antes de levar as amostras para estufa, as cápsulas vazias foram pesadas e enumeradas, registrando os valores correspondentes. Em seguida, as amostras obtidas em cada ensaio foram depositadas nas cápsulas e realizou-se uma nova pesagem (solo úmido + cápsula), anotando-se novamente. O material foi levado à estufa com temperatura de 105 °C até 110°C, em um intervalo de 16 a 24 horas. Após esse intervalo as amostras foram retiradas e pesadas novamente (solo seco + cápsula). As cápsulas foram deixadas sem tampa durante todo período na estufa.

Com a finalidade de simplificar os cálculos, os pesos das amostras em gramas (g) foram documentados em uma tabela. A Equação 1 foi empregada para calcular o teor de umidade (w (%)) da amostra ensaiada. Já para determinar o limite de plasticidade (LP), utilizou-se a média das amostras para o teor de umidade, obtida a partir do resultado da umidade média em porcentagem. O Quadro 3 foi utilizado como suporte para o cálculo do teor de umidade das amostras.

Quadro 3 - Modelo de quadro utilizado para cálculo de teor de umidade

Amostras (g)	1	2	3	4	5
Nº da cápsula					
Cápsula + solo + água (g)					
Cápsula + solo (g)					
Cápsula (g)					
Massa de água (g)					
Massa de Solo (g)					
Teor de umidade (%)					
Umidade Média (%)					

Fonte: Adaptado da ABNT (2016)

Para calcular o índice de plasticidade do solo, empregou-se a Equação 4 e a Tabela 2 apresenta a classificação utilizada para o limite de plasticidade com base no limite de liquidez.

$$IP = LL - LP \quad (4)$$

Na qual:

IP = Índice de Plasticidade

LL = Limite de Liquidez

LP = Limite de Plasticidade

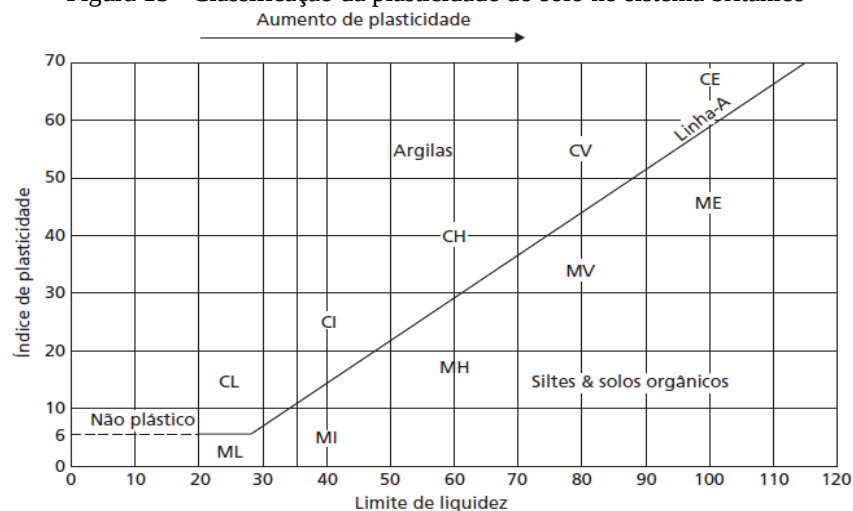
Tabela 2 - Classificação do limite de plasticidade do solo

Limite de liquidez	Termo de plasticidade
< 20 (ou IP < 6)	Não plástico
20 - 35	Baixo
35 - 50	Intermediário
50 - 70	Alto
70 - 90	Muito alto
> 90	Extremamente alto

Fonte: Adapto de Barnes (2016)

As análises dos resultados seguiram a classificação do sistema britânico BS 1377-2:1990, conforme ilustrado nas Figuras 13 e na Tabela 3 (Knappett; Craig, 2014).

Figura 13 - Classificação da plasticidade do solo no sistema britânico



Fonte: Knappett; Craig (2014)

Tabela 3 - Classificação do solo de acordo com a plasticidade

Termos principais		Termos qualificadores	
Pedregulho	G	Bem graduado	W
Areia	S	Mal graduado	P
		Uniforme	Pu
		Graduação aberta	Pg
Solo Fino, finos	F	De baixa plasticidade ($w_L < 35$)	L
Silte (solo M)	M	De plasticidade intermediária plasticidade (w_L 35-50)	I
Argila	C	De alta plasticidade (w_L 50-70)	H
		De plasticidade muito alta (w_L 70-90)	V
		De plasticidade extremamente alta ($w_L > 90$)	E
		Da faixa superior de plasticidade ($w_L > 35$)	U
		Orgânico (pode ser um sufixo para qualquer grupo)	O
Turfa	Pt		

Fonte: Adaptado de Knappett; Craig (2014)

3.3.3 Resíduo de casca de arroz e óleo de cozinha usado

Para estabilização do adobe foram testados dois aditivos, o resíduo de casca de arroz e óleo de cozinha usado. Para o experimento a casca de arroz foi doada pela empresa *Solito Alimentos*, beneficiadora de arroz localizada na cidade de Santa Cruz do Rio Pardo -SP. A quantidade do resíduo de casca de arroz recebida foi de 120 kg, acondicionada em sacos de 60 kg. O óleo de cozinha usado foi coletado na residência da autora do estudo e a quantidade estimada utilizada foi de aproximadamente 6 litros.

3.3.4 Preparação da água para produção do adobe

A água a ser empregada deve satisfazer os mesmos critérios exigidos para aquela utilizada em concretos e argamassas. Além disso, é necessário atender a determinados requisitos físicos e químicos, caso não provenha de uma fonte pública de água potável, conforme estabelecido pela Norma NM137/97 (água destinada ao amassamento e cura de argamassa e concreto de cimento Portland) (ABNT, 2020). A água utilizada no experimento foi da rede pública do município de Guaratinguetá, e a quantidade estimada foi determinada conforme os ensaios de consistência (limites de liquidez e limites de plasticidade) obtidos nos ensaios.

3.4 PROCEDIMENTO PARA PRODUÇÃO DO ADOBE

3.4.1 Preparação de traços e dosagens

Na elaboração do traço para o adobe experimental, foram utilizadas dosagens distintas de casca de arroz, com porcentagens de 0,3% e 0,6% em peso seco de solo. Além disso, incorporou-se ao adobe uma porcentagem de 1% de óleo de cozinha usado, também em peso seco de solo. As proporções dos aditivos foram determinadas com base em estudos que contemplaram até 1% de casca de arroz em peso seco de solo. As porcentagens variaram de 0,3% a 0,75% para a casca de arroz, demonstrando bons resultados (Ige; Danso, 2022; Oskouei et al., 2017). Quanto ao óleo de cozinha usado, a referência utilizada foi de 1% em peso de solo seco conforme indicado por Eires et al., 2017. Foram acrescentados 20% de areia aos traços 2 e 3 para a composição granulométrica do solo, seguindo as diretrizes da norma NBR 16.814/2020 que preconiza uma faixa ideal entre 45% e 65% (ABNT, 2020). Essa adição teve como objetivo aumentar esse parâmetro e verificar esses limites. A análise granulométrica

demonstrou um valor de distribuição granulométrica de 46,36% de areia. A Tabela 4 detalha os traços dos blocos de adobe estudados.

Tabela 4 - Traços dos blocos de adobe estudados	
Nome	Traços dos blocos de adobe
Traço 1	100% solo
Traço 2	Solo; 0,3% de Casca de arroz; 1% óleo de cozinha usado, 20% de areia
Traço 3	Solo; 0,6% de Casca; 1% óleo de cozinha usado, 20% de areia
Traço 4	Solo; 0,3% de Casca; 1% óleo de cozinha usado, sem areia
Traço 5	Solo; 0,6% de Casca; 1% óleo de cozinha usado, sem areia

Fonte: Autora

3.4.2 Preparação dos moldes para produção do blocos de adobe

A fim de assegurar a uniformidade dos adobes, foi produzido um molde retangular de madeira com fundo falso. Os cálculos para o protótipo foram fundamentados nas dimensões dos adobes, conforme especificado na NBR 16814/2020. As medidas adotadas foram de 7,0 cm para altura (H) do adobe e de 0,50 cm para junta de assentamento (J). Os cálculos dimensionais do molde foram realizados utilizando as Equações 5 e 6.

$$C = 2 L + j \quad (5)$$

$$L = 2 H + j \quad (6)$$

Na qual:

$$H \geq 7 \text{ cm}; j \leq 2 \text{ cm}$$

*as medidas adotadas para os moldes do projeto serão $H=7,0 \text{ cm}$ e $j = 0,50$

O molde empregado na confecção dos blocos de adobe possuía as seguintes dimensões: 29,50 cm de comprimento (C), 14,50 cm largura (L) e 7,0 cm altura (H). As medidas já contemplavam a tolerância de $\pm 5\text{mm}$ para as dimensões efetivas do bloco, levando em conta a retração durante secagem dos adobes. Foram produzidos 4 moldes com capacidade de aproximadamente de 5 kg de material. A Figura 14 ilustra o protótipo para modelagem dos blocos.

Figura 14 - Molde para modelagem dos blocos de adobe

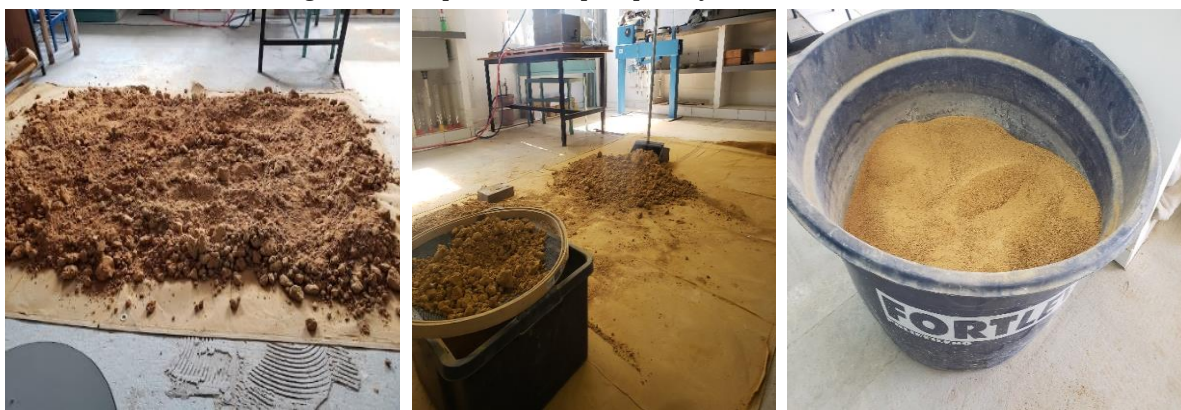


Fonte: Autora

3.4.3 Produção do bloco de adobe

Para produção do adobe, o solo foi submetido a um processo de secagem ao ar, sendo espalhado sobre uma lona plástica por um período de 24 horas. Após esse intervalo, o material foi submetido a peneiramento com objetivo de desmanchar os torrões e remover materiais orgânicos (raízes e galhos). O solo peneirado foi então armazenado em uma caixa plástica com capacidade de 500 litros. A Figura 15 apresenta a sequência de coleta de solo, o processo de peneiramento e o armazenamento de solo para produção dos blocos de adobe.

Figura 15 - Preparo do solo para produção dos blocos de adobe



Fonte: Autora

Os materiais utilizados para fabricar os blocos de adobe (resíduos de casca de arroz, óleo de cozinha usado e areia) foram pesados separadamente, como pode ser observado na Figura 16.

Figura 16 - Materiais utilizados para a produção dos blocos de adobe



Fonte: Autora

3.4.3.1 Mistura, moldagem e amassamento

A mistura dos materiais foi dividida em duas etapas: na primeira etapa do experimento, os traços 1, 4 e 5 foram produzidos sem adição de areia na composição, conforme indicado na Tabela 3. A mistura foi realizada manualmente e, em seguida, deixada em repouso por 24 horas seguindo as diretrizes da Norma NBR 16814/2020. Durante esse período, a mistura foi coberta com lona plástica para evitar perda de umidade. Após as 24 horas os materiais utilizados para a produção dos blocos de adobe foram amassados, colocados nos moldes e desmoldados imediatamente após moldagem. Na Figura 17 pode ser observado como foi realizada a mistura manual e a moldagem dos blocos de adobe.

Figura 17 - Mistura e moldagem dos blocos de adobe



Fonte: Autora

Na segunda etapa, a mistura dos materiais foi realizada com auxílio de uma betoneira, visando obter uma mistura o mais homogênea possível e otimizar o processo. Os materiais foram adicionados gradualmente até atingir o limite de consistência adequado para moldagem. Um total de 60 kg de massa foi colocado na betoneira e após a mistura completa dos materiais os adobes foram moldados.

Embora a NBR 16814/2020 para produção de adobe recomende que a massa seja deixada em repouso por 24 horas, nesta etapa do experimento optou-se por fazer os traços experimentais 2 e 3 sem repouso, pois a mistura ficou bem uniforme com o uso da betoneira, melhorando a trabalhabilidade do solo. A Figura 18 apresenta os equipamentos utilizados na produção dos blocos de adobe na segunda etapa de produção.

Figura 18 - Betoneira utilizada na mistura dos traços



Fonte: Autora

3.4.3.2 Secagem, cura e armazenagem do adobe

Os blocos de adobe permaneceram sobre uma placa de madeira para permitir sua completa secagem, sendo virados a cada 15 dias para assegurar uma cura uniforme. Foram produzidos 18 blocos para cada traço. Todos os blocos foram enumerados e armazenados em local fresco até o dia do ensaio. A Figura 19 ilustra os blocos de adobe durante processo de cura para posterior armazenagem.

Figura 19 - Processo de cura e armazenagem dos adobes



Fonte: Autora

3.5 PROCEDIMENTO PARA OS ENSAIOS COM OS BLOCOS DE ADOBE

Os blocos de adobe devem atender os requisitos da NBR 16814/2020, que são necessários para o uso e comercialização. Os blocos foram ensaiados aos 28, 60 e 120 dias, sendo realizados os ensaios: físico e de resistência à compressão, com base na Norma NBR16814 (ABNT, 2020) e ensaio de absorção de água, conforme a norma NBR 10836 (ABNT, 2012) para bloco solo-cimento, ambas detalhadas nas seções subsequentes.

3.5.1 Caracterização dimensional dos blocos de adobe

Durante o período de secagem dos blocos de adobe, ocorreu uma leve retração que pode ter afetado as dimensões efetivas, sendo necessário garantir que as medidas estejam dentro dos padrões estabelecidos pela norma NBR 16814 (ABNT, 2020). Conforme as especificações, os valores devem apresentar uma variação de até ± 5 mm nas dimensões (comprimento, largura e altura).

Para determinar as características dimensionais de cada bloco de adobe (i) que compõe a amostra foram realizadas duas medidas para cada direção (altura, largura e comprimento), utilizando uma régua metálica de 0,50 mm e um paquímetro com precisão de 0,02 mm. Em seguida, calculou-se a média utilizando as Equações 7, 8 e 9. Para obter os valores médios respectivos, utilizaram-se as Equações 10, 11 e 12. A Figura 20 ilustra o ensaio para determinação das características dimensionais dos adobes.

$$Hi = \frac{H_1 + H_2}{2} \quad (7)$$

$$Li = \frac{L_1 + L_2}{2} \quad (8)$$

$$Ci = \frac{C_1 + C_2}{2} \quad (9)$$

No qual:

Hi , Li e Ci são as dimensões médias para altura, largura e comprimento do adobe (i) em mm

$$H_m = \frac{\sum_1^n H_1}{n} \quad (10)$$

$$L_m = \frac{\sum_1^n L_1}{n} \quad (11)$$

$$C_m = \frac{\sum_1^n C_1}{n} \quad (12)$$

No qual:

H_i , L_i e C_i são as dimensões médias para altura, largura e comprimento do adobe (i) em mm

“n” é o número de corpos de prova da amostra

Figura 20 – Ensaio para determinação das características dimensionais



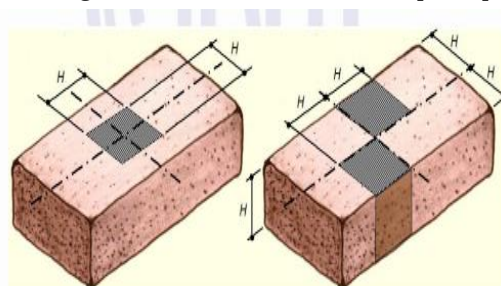
Fonte: Autora

3.5.2 Procedimento para ensaio de resistência à compressão

A Norma NBR 16814 (ABNT, 2020) determina que resistência mínima à compressão individual do bloco de adobe (f_{cak}) deve ser $\geq 1,5$ MPa. O ensaio foi realizado utilizando uma máquina do Modelo Zeloso, com capacidade de 100 toneladas. Para realizar o ensaio de resistência, primeiramente fez-se um recorte cúbico no bloco, com auxílio de uma máquina de corte de bloco de concreto para fazer o recorte das amostras que será o corpo de prova, sendo as dimensões do lado iguais à menor dimensão do bloco.

Neste ensaio foram retiradas duas amostras cúbicas de cada bloco de adobe. A Figura 21 apresenta o recorte cúbico utilizado como corpo de prova no ensaio de resistência à compressão e na Figura 22, pode ser observado o corte dos corpos de prova.

Figura 21 - Recorte cúbico do corpo de prova



Fonte: ABNT (2020)

Figura 22 - Corte dos corpos de prova



Fonte: Autora

Após a retirada dos corpos de prova dos blocos de adobe, foi realizado um capeamento nas duas faces da amostra, com uma pasta plástica de argamassa de cimento com aproximadamente 3 mm de espessura, conforme especificação da Norma. Os blocos foram capeados e esperou-se uma secagem de 24 horas para o ensaio. A Figura 23 mostra a argamassa utilizada no processo de capeamento dos corpos de prova e início do capeamento.

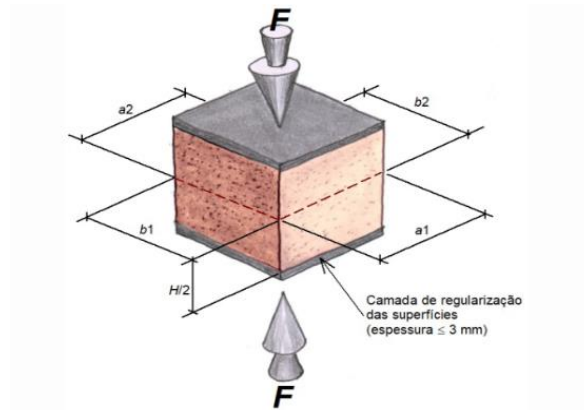
Figura 23 - Processo de capeamento dos corpos de prova



Fonte: Autora

Antes do ensaio de compressão os valores das dimensões da seção de ruptura (a_1 , a_2 , b_1 , b_2) do corpo de prova foram anotados e a Equação 13 foi utilizada para calcular a área da seção de ruptura do corpo de prova. A Figura 24 ilustra a medição das dimensões de seção de ruptura do corpo de prova.

Figura 24 - Dimensões da ruptura do corpo de prova



Fonte: ABNT (2020).

$$A_{rup} = \frac{a1 + a2}{2} \cdot \frac{b1 + b2}{2} \quad (13)$$

No qual:

A_{rup} é área de seção de ruptura (mm); a_1 , a_2 , b_1 , b_2 são dimensões da seção de ruptura (mm)

Após anotados os valores das seções de ruptura, o corpo de prova foi colocado na prensa para realização do ensaio de compressão axial e os valores da ruptura do corpo de prova foram registrados. A Equação 14 foi utilizada para calcular a resistência à compressão do corpo de prova e na Figura 25 execução do ensaio de compressão axial.

$$fca = \frac{F_{rup}}{A_{rup}} \quad (14)$$

No qual:

fca = Resistência a compressão do corpo de prova, expressa em Megapascals (MPa)

F_{rup} = Força de ruptura expressa em Newtons (N)

A_{rup} = Área da seção de ruptura, expressa em milímetros quadrados (mm²)

Figura 25 - Ensaio de resistência mecânica



Fonte: Autora

A resistência característica à compressão do adobe (f_{cak}) é o valor acima do qual existe a probabilidade de se encontrarem 95% dos resultados individuais da população e foi calculado utilizando a Equação 15.

$$f_{cak} = f_{cam} - 1,645 \times Sd \quad (15)$$

No qual:

f_{cak} = Resistência característica à compressão do adobe expressa em MPa

f_{cam} = Resistência à compressão média da amostra (n corpos de prova), expressa em MPa

Sd = Desvio padrão da amostra expresso em MPa

3.5.3 Ensaio de absorção de água

Os blocos de adobe foram submetidos ao ensaio de absorção de água conforme a NBR 10836 (ABNT, 2012), os blocos foram levados à estufa em uma temperatura entre 105°C e 110°C por um período de 24 horas. Após esse período os blocos foram retirados da estufa e deixados em local fresco até atingirem a temperatura ambiente e fez-se uma pesagem dos blocos (peso seco). Na sequência, os blocos foram imergidos em água potável em recipiente por 24 horas, após esse período os blocos foram retirados para pesagem (peso úmido). A Equação 16 foi utilizada para obter os valores de absorção de água. Na Figura 26 observa-se a sequência do ensaio de absorção de água.

$$A = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad (16)$$

No qual:

A = Absorção de água expressa em porcentagem

m_1 = Massa do corpo de prova seco em estufa (g)

m_2 = Massa do corpo de prova saturado (g)

Figura 26 – Ensaio de absorção de água



Fonte: Autora

3.5.4 Análise da Microestrutura

Foi empregado um microscópio óptico para analisar a microestrutura dos traços 1, 2 e 3 em várias escalas, a fim de observar suas características. A análise microscópica foi realizada utilizando a técnica de microscopia óptica, por meio um microscópio de luz refletida Zeiss AxioImager Z2m totalmente motorizado, equipado com uma câmera digital Zeiss AxioCam ICc3 acoplada por um adaptador (1.03) com controles de alinhamento para translação e rotação. Amostras de pequenas dimensões foram obtidas a partir dos corpos de prova com formato cúbico, apresentando 10 mm x 10 mm x 10 mm. As imagens obtidas são formadas a partir de mapas de elevação, com várias camadas de imagens, para melhorar o foco da imagem (HEIN et al., 2012). Os resultados para interpretação dos resultados da microscopia óptica foi baseado em estudos anteriores utilizando técnica de microscopia com outros tipos de materiais e compósitos).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, são expostos os resultados obtidos, que abrangem as etapas preliminares de caracterização do solo natural, ensaios físicos e mecânicos, de absorção de água e análise da microestrutura do material.

4.1 Caracterização do Solo

4.1.1 Limite de Liquidez do solo (LL)

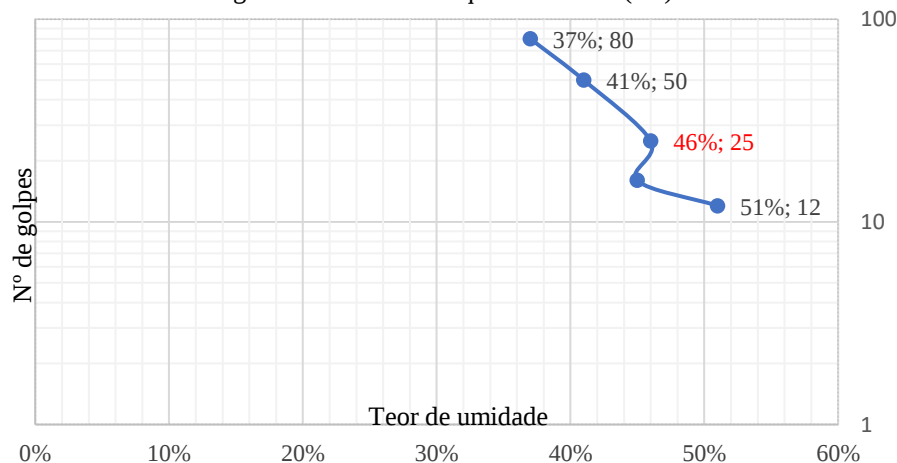
Os resultados do ensaio de limite de liquidez (LL) estão registrados na Tabela 5, e na Figura 27, destaca-se o ponto que representa o limite de liquidez do solo para o teor de umidade de 25 golpes. Nessa figura, é evidenciado que o limite de liquidez do solo encontrado foi de 46%.

Tabela 5 - Dados obtidos nos ensaios de limite de liquidez do solo (LL)

Amostras (g)	1	2	3	4	5
Nº da cápsula	M3	M7	M15	M16	M17
Cápsula + solo + água (g)	19,98	19,17	18,99	17,99	19,67
Cápsula + solo (g)	17,87	17,23	16,69	15,99	17,24
Cápsula (g)	12,16	12,54	11,64	11,51	12,51
Massa de água (g)	2,11	1,94	2,30	2,00	2,43
Massa de Solo (g)	5,71	4,69	5,05	4,48	4,73
Teor de umidade (%)	37%	41%	46%	45%	51%
Nº de Golpes	80	50	25	16	12

Fonte: Autora

Figura 27 - Limite de liquidez do solo (LL)



Fonte: Autora

Valores situados entre 35% e 50% no limite de liquidez indicam que o solo apresenta uma plasticidade intermediária, de acordo com Barnes (2016). Os solos com plasticidade intermediária ocupam uma posição entre os limites de liquidez e plasticidade, sugerindo características plásticas moderadas. Esses solos manifestam uma combinação de propriedades de solos argilosos e arenosos, sendo moldáveis, embora não tão facilmente quanto as argilas altamente plásticas. Adicionalmente, eles tendem a manter sua forma após deformação (Barnes, 2016). De acordo com a classificação do sistema britânico BS 1377-2:1990, os resultados sugerem que o solo examinado pode ser categorizado como silte.

4.1.2 Limite de Plasticidade do solo (LP)

A Tabela 6 apresenta os valores obtidos no ensaio de determinação do limite de plasticidade (LP). O limite de plasticidade é o valor médio dos teores de umidade, o valor encontrado foi de 26,77% para o solo ensaiado.

Tabela 6 - Dados para determinação do limite de plasticidade					
Amostras (g)	1	2	3	4	5
Nº da cápsula	M23	M25	M28	M29	M30
Cápsula + solo + água (g)	13,47	12,63	12,58	12,49	13,28
Cápsula + solo (g)	13,25	12,40	12,31	12,37	13,07
Cápsula (g)	12,39	11,59	11,36	11,39	12,12
Massa de água (g)	0,22	0,23	0,27	0,12	0,21
Massa de Solo (g)	0,96	0,81	0,95	0,98	0,95
Teor de umidade (%)	25,58	28,40	28,42	29,35	22,11
Umidade média (%)					26,77
Desvio Padrão					2,65

Fonte: Autora

4.1.3 Teor de Umidade do Solo

Os resultados do teste de teor de umidade do solo estão registrados na Tabela 7, onde se nota que a média da umidade do solo é de 17,91%.

Tabela 7 - Dados para determinação do teor de umidade do solo (continua)			
Amostras (g)	1	2	3
Nº da cápsula	G4	G43	G44
Cápsula + solo + água (g)	190,61	109,06	117,01

Tabela 7 - Dados para determinação do teor de umidade do solo (continuação)

Amostras (g)	1	2	3
Massa de água (g)	7,81	10,85	11,91
Massa de Solo (g)	43,41	61,22	66,16
Teor de umidade W (%)	17,99	17,72	18,00
Umidade Média (%)			17,91
Desvio Padrão			0,129

Fonte: Autora

Os valores obtidos para os Limites de Atterberg (limites de consistência) correspondem ao limite de liquidez (LL) de 46%, limite de plasticidade (LP) de 26,77% e índice de plasticidade (IP) de 19,23%. Os resultados estão resumidos na Tabela 8.

Tabela 8 - Resumo dos resultados obtidos para os Limites de Consistência

Ensaio	Valor (%)
Limite de liquidez (LL)	46,00%
Limite de Plasticidade (LP)	26,77%
Índice de Plasticidade (IP)	19,23%

Fonte: Autora

A Norma NBR 16814 (ABNT, 2020) não estabelece critérios específicos para limites de liquidez e limites de plasticidade a serem aplicados na fabricação de blocos de adobe. No entanto, a NBR 10836/2012 prescreve que blocos de solo-cimento devem apresentar limites de liquidez (LL) $\leq 45\%$ e limite de plasticidade (LP) $\leq 18\%$. Os resultados da análise do solo indicam que os valores obtidos excedem os parâmetros estabelecidos por essa Norma. No contexto bloco solo-cimento, esses valores não seriam apropriados, uma vez que a plasticidade elevada torna o solo inadequado para essa finalidade. Os blocos de solo-cimento requerem um solo com menor plasticidade (ABNT, 2012).

Em contrapartida, para produção de blocos de adobe, essa situação pode ser considerada de maneira distinta, visto que em algumas pesquisas, os parâmetros de caracterização do solo para produção dos blocos variaram. Os limites de liquidez (LL) foram encontrados em faixas de 33%, 36% e 56% e os limites de plasticidade (LP) oscilaram entre de 21%, 22% e 35%. Quanto ao índice de plasticidade (IP), os valores variam de 12%, 14% e 21%, respectivamente (Babé et al., 2021; Muhammad et al., 2020; Palumbo et al., 2016).

As variações demonstram que os parâmetros do solo eram adequados para fabricação dos blocos de adobe, atendendo aos padrões brasileiros e apresentando similaridades com estudos anteriores envolvendo blocos de terra. Alguns estudos evidenciaram que, mesmo que a

distribuição dos grãos e os limites de consistência não estejam em conformidade com critérios recomendados, é possível fabricar blocos de terra compactada (BTC) utilizando uma ampla variedade de solos (Laborel-Préneron et al., 2017).

4.1.4 Análise granulométrica do solo

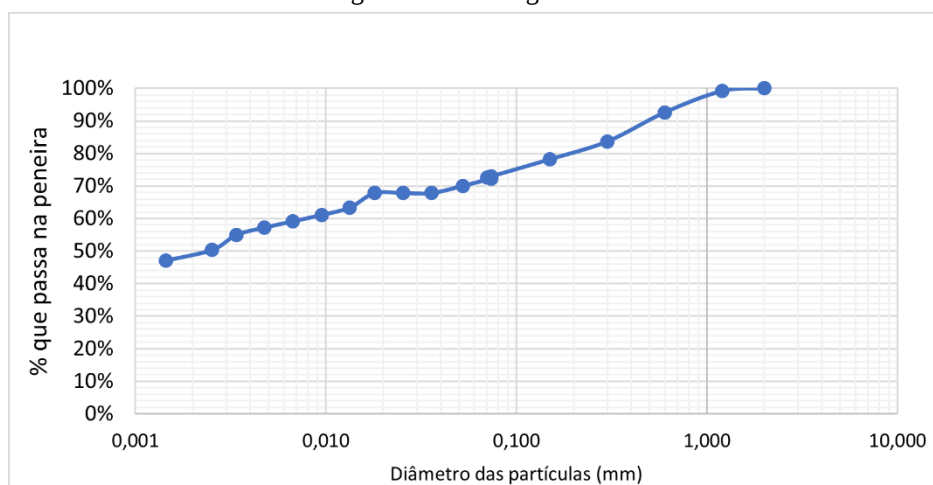
A análise granulométrica fornece as proporções individuais de cada fração do solo, como pode ser observado na Tabela 9. Os resultados indicam uma distribuição granulométrica com 46,36% de areia (com o diâmetro de partículas entre 0,06 mm e 2,0 mm), 27,01 % de silte (com o diâmetro das partículas entre 0,02 e 0,06 mm) e 26,63% para argila (com o diâmetro das partículas menores que 0,002 mm).

Tabela 9 - Distribuição granulométrica do solo			
Material	Diâmetro das partículas	Porcentagem de material	NBR 16814/2020
Areia (fina- grossa)	Entre 0,06 mm e 2,0 mm	46,36%	45% e 65%
Argila	< 0,002 mm	26,63%	25% - 30%
Silte	Entre 0,002 mm e 0,06mm	27,01%	Até 30%

Fonte: Autora

A curva de distribuição granulométrica do solo está apresentada na Figura 28 e relaciona a porcentagem de solo que passa na peneira em função do diâmetro da peneira. De acordo com esses parâmetros é possível verificar que se trata de um solo fino, pois 73% de material passa na peneira 0,074 mm.

Figura 28 - Curva granulométrica do solo



Fonte: Autora

A granulometria se enquadra nos intervalos definidos pela norma NBR 16814 (ABNT, 2020) para produção de blocos de adobe, onde o teor de areia situa-se entre 45% e 65%, silte de até 30% e argila entre 25% e 35%. Portanto, com base nos dados obtidos, verificou-se que o solo poderia ser utilizado para produzir blocos de adobe, sem a necessidade de realizar ajuste na granulometria.

Apesar do uso extensivo de blocos e outros materiais de adobe, ainda existem poucas normas nacionais e internacionais que ofereçam diretrizes e práticas mais abrangentes sobre a construção com adobe. De maneira geral, elas reportam apenas códigos para testes simples de compressão (Abdulla; Cunningham; Gillie, 2020). Os intervalos de granulometria variam bastante, com os seguintes intervalos normalmente empregados: 22–53% de argila e silte, 55–75% de areia e cascalho, e outros que variam entre 20% de uma fração fina de argila e silte, 74% de areia e 6% de brita (Palumbo et al., 2016; Parisi et al., 2015).

4.2 ENSAIOS COM OS BLOCOS DE ADOBE

A Norma NBR 16814/2020 estipula que, para lotes contendo até 30.000 blocos, pode ser utilizada uma amostra de 13 blocos. No contexto do experimento em questão, optou-se por utilizar 18 blocos para cada tipo de traço a ser ensaiado, dividindo-os igualmente em grupos de 6 para os tempos de cura de 30, 60 e 120 dias. Foram utilizados 6 corpos de prova para cada ensaio (resistência e absorção de água). A seguir encontram-se os resultados dos ensaios físicos, mecânicos, absorção de água e ensaio de microscopia óptica.

4.2.1 Ensaio de características dimensionais

As amostras mantiveram as medidas das características dimensionais dentro dos padrões estabelecidos pela Norma NBR 16814/2020, com uma margem de tolerância de ± 5 mm para as dimensões de comprimento, largura e espessura. Os valores correspondentes às características dimensionais aos 28, 60 e 120 dias estão apresentados nas Tabelas 10, 11 e 12, respectivamente.

Tabela 10 - Características dimensionais aos 28 dias (continua)

Traço 1	comprimento		Média	largura		Média	altura		Média
	C1	C2		L1	L 2		H1	H2	
CP1	27,80	27,58	27,69	13,30	13,20	13,25	7,45	7,42	7,44
CP2	27,30	27,25	27,28	13,40	13,40	13,40	7,20	7,42	7,31

Tabela 10 - Características dimensionais aos 28 dias (continua)

Traço 1	comprimento		Média	largura		Média	altura		Média
	C1	C2		L1	L 2		H1	H2	
CP3	27,10	27,20	27,15	13,30	13,40	13,35	6,80	6,85	6,83
CP4	27,05	27,10	27,08	13,30	13,40	13,35	6,80	6,85	6,83
Média das amostras			27,30			13,34			7,10
Desvio Padrão			0,27			0,06			0,32
Traço 2	comprimento		Média	largura		Média	altura		Média
	C1	C2		L1	L 2		H1	H2	
CP1	27,56	27,54	27,55	13,67	13,49	13,58	7,19	6,73	6,96
CP2	28,32	28,34	28,33	13,89	14,00	13,95	7,80	7,42	7,61
CP3	28,56	28,40	28,48	13,77	14,30	14,04	7,07	6,35	6,71
CP4	28,01	27,65	27,83	13,80	14,30	14,05	6,76	6,86	6,81
CP5	27,62	27,59	27,61	13,74	13,65	13,70	7,00	6,66	6,83
CP6	28,09	28,20	28,15	13,75	13,89	13,82	7,28	7,13	7,21
Média das amostras			27,99			13,85			7,02
Desvio Padrão			0,39			0,19			0,34
Traço 3	comprimento		Média	largura		Média	altura		Média
	C1	C2		L1	L 2		H1	H2	
CP1	27,50	27,60	27,55	13,40	13,30	13,35	7,50	7,00	7,25
CP2	27,60	27,70	27,65	13,30	13,40	13,35	6,95	6,98	6,97
CP3	27,40	27,50	27,45	13,10	13,45	13,28	6,50	6,50	6,50
CP4	28,00	27,80	27,90	13,50	14,20	13,85	7,68	7,49	7,59
CP5	27,80	28,00	27,90	13,98	14,00	13,99	7,80	7,64	7,72
CP6	28,59	28,50	28,55	14,12	14,33	14,23	6,91	6,36	6,64
Média das amostras			27,83			13,33			6,91
Desvio Padrão			0,39			0,04			0,38
Traço 4	comprimento		Média	largura		Média	altura		Média
	C1	C2		L1	L 2		H1	H2	
CP1	27,50	27,60	27,55	13,40	13,30	13,35	7,50	7,00	7,25
CP2	27,60	27,70	27,65	13,30	13,40	13,35	6,95	6,98	6,97
CP3	27,40	27,50	27,45	13,10	13,45	13,28	6,50	6,50	6,50
CP4	28,00	27,80	27,90	13,50	14,20	13,85	7,68	7,49	7,59
CP5	27,80	28,00	27,90	13,98	14,00	13,99	7,80	7,64	7,72
CP6	28,59	28,50	28,55	14,12	14,33	14,23	6,91	6,36	6,64
Média das amostras			27,83			13,33			6,91
Desvio Padrão			0,39			0,04			0,38
Traço 5	comprimento		Média	largura		Média	altura		Média
	C1	C2		L1	L 2		H1	H2	
CP1	27,00	27,20	27,10	13,40	13,28	13,50	7,50	7,10	7,30
CP2	27,60	27,80	27,70	13,30	13,00	13,20	6,95	6,80	6,88
CP3	27,56	27,50	27,53	13,22	13,40	13,31	6,50	6,57	6,54
CP4	28,05	27,80	27,93	13,52	14,15	13,84	7,20	7,49	7,35
CP5	27,80	28,01	27,91	13,94	14,00	13,97	7,80	7,87	7,84
CP6	28,49	28,54	28,52	14,05	14,30	14,18	6,87	6,30	6,59
Média das amostras			27,78			13,34			6,90
Desvio Padrão			0,47			0,15			0,38

Tabela 11- Características dimensionais aos 60 dias (continua)

Traço 1	comprimento		Média	largura		Média	altura		Média
	C1	C2		L1	L 2		H1	H2	
CP1	27,80	27,50	27,65	13,30	13,45	13,38	7,50	7,42	7,46
CP2	27,30	27,20	27,25	13,40	13,80	13,60	7,30	7,44	7,37
CP3	27,00	27,30	27,15	13,45	13,56	13,51	6,90	6,98	6,94
CP4	27,10	27,33	27,22	13,55	13,40	13,48	7,85	7,40	7,63
CP5	27,58	27,20	27,39	13,15	13,33	13,24	7,20	7,46	7,33
CP6	27,46	27,50	27,48	13,20	13,45	13,33	7,21	7,25	7,23
Média das amostras			27,36			13,42			7,33
Desvio Padrão			0,19			0,13			0,23
Traço 2	comprimento		Média	largura		Média	altura		Média
	C1	C2		L1	L 2		H1	H2	
CP1	27,51	27,52	27,52	13,50	13,52	13,51	7,25	7,54	7,40
CP2	28,01	27,02	27,52	13,20	13,50	13,35	7,52	7,51	7,52
CP3	27,51	27,50	27,51	13,52	13,51	13,52	7,54	7,51	7,53
CP4	27,20	27,40	27,30	13,54	13,52	13,53	7,45	7,54	7,50
CP5	28,00	28,10	28,05	13,80	13,43	13,62	7,50	7,56	7,53
CP6	28,10	28,32	28,21	13,54	13,86	13,70	7,54	7,50	7,52
Média das amostras			27,68			13,54			7,50
Desvio Padrão			0,36			0,12			0,05
Traço 3	comprimento		Média	largura		Média	altura		Média
	C1	C2		L1	L 2		H1	H2	
CP1	27,50	27,52	27,51	13,20	13,50	13,35	7,20	7,52	7,36
CP2	28,20	28,10	28,15	14,31	13,60	13,96	7,50	7,50	7,50
CP3	28,10	28,40	28,25	14,30	13,58	13,94	7,25	7,20	7,23
CP4	28,50	28,45	28,48	14,10	14,85	14,48	7,54	7,58	7,56
CP5	28,46	28,52	28,49	14,00	13,95	13,98	7,53	7,48	7,51
CP6	27,90	27,56	27,73	13,95	13,91	13,93	7,58	7,54	7,56
Média das amostras			28,10			13,94			7,45
Desvio Padrão			0,40			0,36			0,13
Traço 4	comprimento		Média	largura		Média	altura		Média
	C1	C2		L1	L 2		H1	H2	
CP1	27,00	27,50	27,25	13,50	13,30	13,40	7,45	7,00	7,23
CP2	27,55	27,45	27,50	13,58	13,20	13,39	6,80	7,50	7,15
CP3	27,80	27,50	27,65	13,20	13,45	13,33	7,00	7,10	7,05
CP4	28,04	27,45	27,75	13,50	14,20	13,85	7,50	7,50	7,50
CP5	27,45	28,04	27,75	13,40	14,25	13,83	7,90	7,46	7,68
CP6	28,40	28,45	28,43	14,00	14,20	14,10	7,00	7,01	7,01
Média das amostras			27,72			13,65			7,27
Desvio Padrão			0,39			0,32			0,27
Traço 5	comprimento		Média	largura		Média	altura		Média
	C1	C2		L1	L 2		H1	H2	
CP1	27,40	27,46	27,43	13,50	13,20	13,50	7,28	7,60	7,44
CP2	27,50	27,80	27,65	13,52	13,50	13,20	6,98	6,90	6,94
CP3	27,49	27,40	27,45	13,50	13,50	13,50	6,95	6,45	6,70

Tabela 11 - Características dimensionais aos 60 dias (continuação)

Traço 5	comprimento		Média	largura		Média	altura		
	C1	C2		L1	L 2		H1	H2	
CP4	28,05	27,50	27,78	13,00	13,98	13,49	7,10	7,00	7,05
CP5	27,50	28,00	27,75	13,49	13,95	13,72	7,50	7,58	7,54
CP6	28,40	28,00	28,20	14,08	14,20	14,14	6,90	6,82	6,86
Média das amostras			27,71			13,59			7,09
Desvio Padrão			0,28			0,32			0,33

Tabela 12 - Características dimensionais aos 120 dias (continua)

Traço 1	comprimento		Média	largura		Média	altura		Média
	C1	C2		L1	L 2		H1	H2	
CP1	28,40	28,45	28,43	14,09	14,00	14,05	6,83	6,63	6,73
CP2	27,30	27,50	27,40	13,60	13,90	13,75	6,35	6,57	6,46
CP3	28,05	28,00	28,03	14,00	14,01	14,01	6,40	6,45	6,43
CP4	28,00	27,98	27,99	13,95	13,80	13,88	6,90	6,85	6,88
CP5	28,20	27,98	28,09	14,02	14,00	14,01	7,00	6,90	6,95
CP6	28,10	27,05	27,58	14,01	13,98	14,00	6,85	6,57	6,71
Média das amostras			27,92			13,95			6,69
Desvio Padrão			0,37			0,11			0,21
Traço 2	comprimento		Média	largura		Média	altura		Média
	C1	C2		L1	L 2		H1	H2	
CP1	28,35	28,41	28,38	14,41	13,84	14,13	6,60	6,54	6,57
CP2	28,60	28,65	28,63	14,20	14,05	14,13	7,05	6,92	6,99
CP3	28,56	28,45	28,51	13,65	14,10	13,88	7,28	7,18	7,23
CP4	28,40	28,36	28,38	13,56	13,73	13,65	6,95	6,79	6,87
CP5	28,40	28,70	28,55	13,86	13,83	13,85	7,31	7,16	7,24
CP6	28,50	28,54	28,52	14,00	13,70	13,85	6,97	6,98	6,98
Média das amostras			28,49			13,91			6,98
Desvio Padrão			0,10			0,19			0,25
Traço 3	comprimento		Média	largura		Média	altura		Média
	C1	C2		L1	L 2		H1	H2	
CP1	28,36	28,42	28,39	13,90	13,88	13,89	6,60	6,70	6,65
CP2	28,20	28,25	28,23	13,74	13,62	13,68	6,80	6,71	6,76
CP3	28,27	28,00	28,14	13,78	14,00	13,89	6,07	6,63	6,35
CP4	28,38	28,30	28,34	13,64	13,90	13,77	7,05	7,08	7,07
CP5	28,12	28,32	28,22	13,55	13,36	13,46	6,57	6,60	6,59
CP6	28,15	28,18	28,17	13,06	13,07	13,07	6,58	6,52	6,55
Média das amostras			28,25			13,82			6,59
Desvio Padrão			0,10			0,12			0,21
Traço 4	comprimento		Média	largura		Média	altura		Média
	C1	C2		L1	L 2		H1	H2	
CP1	28,00	28,50	28,25	13,86	13,90	13,88	6,50	6,80	6,65
CP2	28,10	28,30	28,20	13,80	13,85	13,83	6,50	6,45	6,48
CP3	28,60	28,40	28,50	13,98	14,04	14,01	6,45	6,58	6,52

Tabela 12 - Características dimensionais aos 120 dias (continuação)

Traço 4	comprimento		Média	largura		Média	altura		Média
	C1	C2		L1	L 2		H1	H2	
CP4	28,30	28,30	28,30	13,64	13,90	13,77	7,00	7,04	7,02
CP5	28,25	28,30	28,28	13,60	13,40	13,50	6,90	6,40	6,65
CP6	28,35	28,40	28,38	13,50	13,08	13,29	6,80	6,45	6,63
Média das amostras			28,32			13,91			6,55
Desvio Padrão			0,11			0,10			0,09

Traço 5	comprimento		Média	largura		Média	altura		Média
	C1	C2		L1	L 2		H1	H2	
CP1	28,36	28,42	28,39	13,90	13,88	13,89	6,60	6,70	6,65
CP2	28,20	28,25	28,23	13,74	13,62	13,68	6,80	6,71	6,76
CP3	28,27	28,00	28,14	13,78	14,00	13,89	6,07	6,63	6,35
CP4	28,38	28,30	28,34	13,64	13,90	13,77	7,05	7,08	7,07
CP5	28,12	28,32	28,22	13,55	13,36	13,46	6,57	6,60	6,59
CP6	28,15	28,18	28,17	13,06	13,07	13,07	6,58	6,52	6,55
Média das amostras			28,25			13,82			6,59
Desvio Padrão			0,10			0,12			0,21

Amostras de blocos de solo sem aditivos em sua composição (traço 1) apresentaram rachaduras após sete dias de secagem. Esse fenômeno é resultado do encolhimento que ocorre durante o processo de cura, onde a evaporação da água presente nos blocos provoca a redução de seu volume (Muhammad et al., 2020). Além disso, diversos outros fatores podem contribuir para o surgimento de fissuras e rachaduras nos adobes, incluindo a quantidade de minerais presentes no solo e sua plasticidade (Caporale et al., 2014). A inclusão de fibras no solo oferece várias vantagens, pois reduzem a formação de fissuras resultantes da retração (Palumbo et al., 2016). No caso da casca de arroz, embora ela não tenha a função de prevenir fissuras, já foi provado que as fibras em geral diminuem aparecimento de fissuras ao longo do tempo (Fratini et al., 2011; Palumbo et al., 2016).

Em um teste de abrasão a seco em blocos de terra compactada (BTC), um estudo empregou palha de lavanda, cevada e casca de arroz na proporção de 3% do peso do solo. A pesquisa constatou que os blocos contendo palha de lavanda apresentaram os melhores resultados de resistência a impactos, sem o surgimento de rachaduras. No entanto essa resistência diminuiu quando os outros dois agregados foram testados (Giroudon et al., 2019). Isso ressalta a importância de considerar que a adição de aditivos nos blocos de adobe pode tanto reduzir quanto aumentar suas características, sendo fundamental adotar a quantidade adequada de aditivos. Isso foi observado nos traços com 0,3% de casca de arroz, que houve menos aparecimento de fissuras do que o traço com 0,6% de cascas.

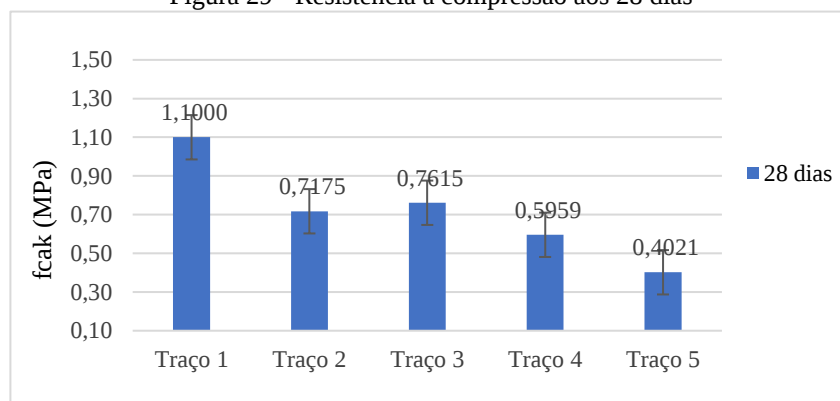
4.2.2 Ensaio de resistência a compressão simples

As resistências mecânicas (f_{cak}) observadas em diferentes proporções e idades não atenderam aos requisitos da NBR 16814/2020 (ABNT, 2020), que estabelece um valor mínimo de 1,5 MPa para blocos de adobe. Aos 28 dias, os resultados variaram de 1,10 MPa para o traço 1 a 0,4021 MPa para o traço 5. A Tabela 13 contém os valores dos testes de compressão dos blocos de adobe aos 28 dias e a Figura 29 ilustra graficamente os resultados.

Tabela 13 - Resistência à compressão dos blocos aos 28 dias de cura

TRAÇO 1	Corpo de prova	AR_{up} (mm ²)	F_{rup} (N)	f_{cak} (MPa)	Desvio Padrão (Sd)	f_{cam} (MPa)	f_{ack} (MPa)
	CP1	4542,40	6000,00	1,32			
TRAÇO 1	CP2	4309,81	8000,00	1,86			
	CP3	4612,34	8000,00	1,73			
	CP4	4465,44	5500,00	1,23	0,2650	1,5351	1,100
TRAÇO 2	Corpo de prova	AR_{up} (mm ²)	F_{rup} (N)	f_{cak} (MPa)	Desvio Padrão (Sd)	f_{cam} (MPa)	f_{ack} (MPa)
	CP1	5019,79	4100,00	0,82			
TRAÇO 2	CP2	4940,55	3600,00	0,73			
	CP3	4706,89	4200,00	0,89			
	CP4	4697,60	4900,00	1,04			
	CP5	4934,48	4800,00	0,97			
	CP6	5589,20	4800,00	0,86	0,1021	0,8854	0,7175
TRAÇO 3	Corpo de prova	AR_{up} (mm ²)	F_{rup} (N)	f_{cak} (MPa)	Desvio Padrão (Sd)	f_{cam} (MPa)	f_{ack} (MPa)
	CP1	5400,69	5700,00	1,06			
TRAÇO 3	CP2	4936,34	4400,00	0,89			
	CP3	4839,38	4600,00	0,95			
	CP4	5478,86	4800,00	0,88			
	CP5	4275,81	3900,00	0,91			
	CP6	4745,48	3600,00	0,76	0,0887	0,9074	0,7615
TRAÇO 4	Corpo de prova	AR_{up} (mm ²)	F_{rup} (N)	f_{cak} (MPa)	Desvio Padrão (Sd)	f_{cam} (MPa)	f_{ack} (MPa)
	CP1	5141,62	3200,00	0,62			
TRAÇO 4	CP2	5105,70	3600,00	0,70			
	CP3	4941,59	4200,00	0,85			
	CP4	4921,68	4200,00	0,85	0,0984	0,7577	0,5958
TRAÇO 5	Corpo de prova	AR_{up} (mm ²)	F_{rup} (N)	f_{cak} (MPa)	Desvio Padrão (Sd)	f_{cam} (MPa)	f_{ack} (MPa)
	CP1	5134,18	2400,00	0,47			
TRAÇO 5	CP2	4995,56	2600,00	0,52			
	CP3	5194,42	2300,00	0,44			
	CP4	4985,76	2100,00	0,42	0,3700	0,4630	0,4021

Figura 29 - Resistência à compressão aos 28 dias



Fonte: Autora

É importante destacar que os valores de resistência à compressão de blocos de adobe reportados por outros estudos apresentam uma ampla faixa, variando de 0,55 MPa a 5,15 MPa. Essas variações podem ser atribuídas a diversos fatores, como as proporções dos materiais na composição do adobe, tipo de solo, além do método de produção e dos diferentes materiais empregados (Abdulla et al., 2020). Dessa forma, conclui-se que é vantajoso empregar um solo com maior plasticidade em comparação ao utilizado e sugerir a combinação desse solo com algum tipo de ligante ou agregado, para garantir uma maior resistência ao bloco de adobe feito com casca de arroz.

Um estudo que empregou casca de arroz na proporção de 0,75% obteve uma resistência de 3,93 MPa aos 28 dias de cura, sem a inclusão de qualquer outro aditivo. Quando a casca de arroz foi usada em conjunto com cal na proporção de 0,75%, os valores aumentaram para 5,17 MPa após 28 dias de cura (Ige; Danso, 2022). Outros resultados foram encontrados utilizando um solo contendo argila altamente plástica com 1% de casca de arroz e 30% de pó de mármore, resultou em uma resistência de 9,27 MPa (Venkatesh et al., 2022). Também foram encontradas percentagens de 0,3%, 0,6% e 0,9% de teores de casca de arroz, combinadas ou não com cal, e os valores correspondentes apresentaram melhores valores nas proporções de 0,3% de casca de arroz e 10% de cal, o que resultou em um valor 4,14 MPa (Oskouei et al., 2017). Ou seja, seria bom utilizar cal nas proporções de 0,3% de casca para melhorar a resistência mecânica.

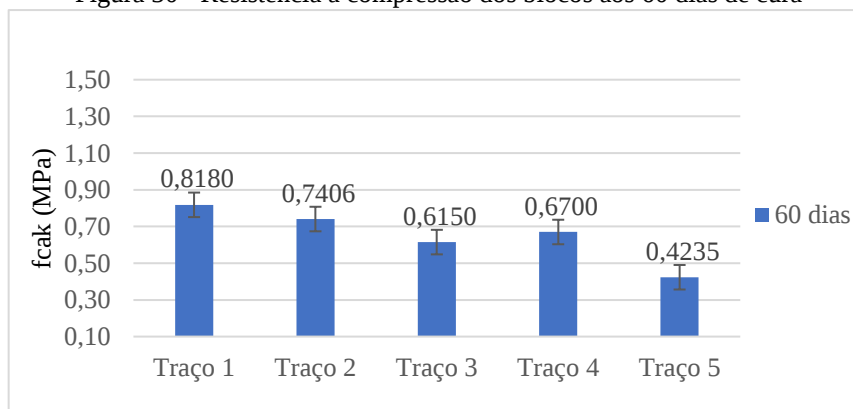
Os blocos de adobe no traço 1, analisados aos 60 dias de cura diminuíram a resistência à compressão, enquanto os traços 2 e 4 aumentaram a resistência. Essas amostras continham 0,3% de casca de arroz na composição e 1% de óleo de cozinha usado. O traço 2 ainda continha um aditivo de 20% de areia. As proporções testadas no adobe experimental refletem uma melhoria na resistência ao longo do tempo, na proporção de 0,3% de casca de arroz, com teores abaixo de 1% de casca de arroz, conforme já foi demonstrado (Danso, 2017). A Tabela 14

apresenta um resumo dos valores obtidos para as resistências à compressão aos 60 dias e a Figura 30 ilustra graficamente esses valores.

Tabela 14 - Resistência à compressão dos blocos aos 60 dias de cura

	Corpo de prova	$ARup$ (mm ²)	Frup (N)	$fcak$ (MPa)	Desvio Padrão (Sd)	$fcam$ (MPa)	$fack$ (MPa)
TRAÇO 1	CP1	4240,41	4200,00	0,99			
	CP2	4754,06	4000,00	0,84			
	CP3	4044,76	3800,00	0,93			
	CP4	6335,91	6900,00	1,08	0,0894	0,9651	0,8180
TRAÇO 2	Corpo de prova	$ARup$ (mm ²)	Frup (N)	$fcak$ (MPa)	Desvio Padrão (Sd)	$fcam$ (MPa)	$fack$ (MPa)
	CP1	4071,90	4200,00	1,03			
	CP2	4798,83	4300,00	0,89			
	CP3	4233,17	4000,00	0,94			
	CP4	4115,15	3100,00	0,75	0,100	0,9064	0,7406
TRAÇO 3	Corpo de prova	$ARup$ (mm ²)	Frup (N)	$fcak$ (MPa)	Desvio Padrão (Sd)	$fcam$ (MPa)	$fack$ (MPa)
	CP1	4216,68	3200,00	0,76			
	CP2	4084,38	3200,00	0,78			
	CP3	4902,45	3200,00	0,65			
	CP4	5343,57	3500,00	0,65	0,0593	0,7125	0,6150
TRAÇO 4	Corpo de prova	$ARup$ (mm ²)	Frup (N)	$fcak$ (MPa)	Desvio Padrão (Sd)	$fcam$ (MPa)	$fack$ (MPa)
	CP1	4931,64	3500,00	0,71			
	CP2	5241,85	3600,00	0,68			
	CP3	5141,48	3700,00	0,72			
	CP4	4781,72	3700,00	0,77	0,0319	0,7225	0,6700
TRAÇO 5	Corpo de prova	$ARup$ (mm ²)	Frup (N)	$fcak$ (MPa)	Desvio Padrão (Sd)	$fcam$ (MPa)	$fack$ (MPa)
	CP1	5254,00	2600,00	0,49			
	CP2	4992,89	2900,00	0,58			
	CP3	5284,96	2300,00	0,44			
	CP4	4986,56	2800,00	0,56	0,0575	0,5131	0,4235

Figura 30 - Resistência à compressão dos blocos aos 60 dias de cura



Fonte: Autora

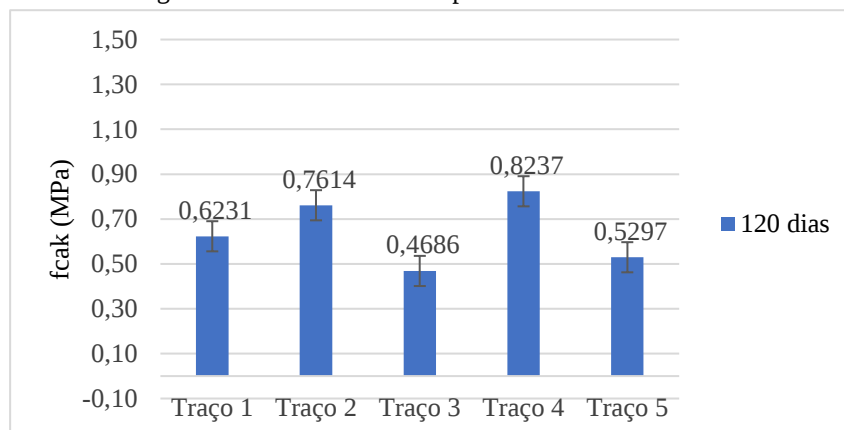
Na Tabela 15, são apresentados os valores obtidos para resistência à compressão aos 120 dias, e a Figura 31 apresenta um resumo gráfico destes valores. Pode-se destacar que o traço 1 e traço 3, solo na composição e 0,6% de casca de arroz e 1% de óleo de cozinha usado respectivamente, tiveram quedas das resistências nesse período. O traço 1 experimentou uma redução em sua resistência ao longo do tempo, caindo de 1,10 MPa para 0,62 MPa e 0,76 para 0,46 MPa, aos 120 dias de cura, respectivamente.

Os traços 2 e 4, embora tenham ficado aquém das especificações da NBR para blocos de adobe, revelaram um leve incremento em sua resistência ao longo do tempo, evidenciado após 120 dias de cura. Nesse período, os valores atingiram 0,76 MPa e 0,82 MPa, respectivamente, representando um aumento de aproximadamente 38,18% para o traço 4 e 6,12% para o traço 2.

Tabela 15 - Resistência à compressão dos blocos aos 120 dias de cura

	Corpo de prova	<i>ARup</i> (mm ²)	Frup (N)	fcak (MPa)	Desvio Padrão (Sd)	fcam (MPa)	fack (MPa)
TRAÇO 1	CP1	5151,58	5200,00	1,01			
	CP2	4307,12	3300,00	0,77			
	CP3	4584,15	3100,00	0,68			
	CP4	4958,18	4200,00	0,85	0,1226	0,8247	0,6231
TRAÇO 2	Corpo de prova	<i>ARup</i> (mm ²)	Frup (N)	fcak (MPa)	Desvio Padrão (Sd)	fcam (MPa)	fack (MPa)
	CP1	4856,530	3900,00	0,80			
	CP2	4982,200	3900,00	0,78			
	CP3	4951,570	4300,00	0,86			
	CP4	4798,500	4300,00	0,89	0,0460	0,8380	0,7614
TRAÇO 3	Corpo de prova	<i>ARup</i> (mm ²)	Frup (N)	fcak (MPa)	Desvio Padrão (Sd)	fcam (MPa)	fack (MPa)
	CP1	4856,53	2900,00	0,59			
	CP2	4982,20	2900,00	0,58			
	CP3	4951,57	2300,00	0,46			
	CP4	4798,50	2800,00	0,58	0,0536	0,5568	0,4686
TRAÇO 4	Corpo de prova	<i>ARup</i> (mm ²)	Frup (N)	fcak (MPa)	Desvio Padrão (Sd)	fcam (MPa)	fack (MPa)
	CP1	4.270,98	3700,00	0,86			
	CP2	4.388,81	3700,00	0,84			
	CP3	4.441,58	3700,00	0,83			
	CP4	4.296,31	3800,00	0,88	0,0201	0,8567	0,8237
TRAÇO 5	Corpo de prova	<i>ARup</i> (mm ²)	Frup (N)	fcak (MPa)	Desvio Padrão (Sd)	fcam (MPa)	fack (MPa)
	CP1	4481,20	4000,00	0,89			
	CP2	4376,06	2900,00	0,66			
	CP3	4123,00	2400,00	0,58			
	CP4	4089,24	3000,00	0,73	0,1143	0,7178	0,5297

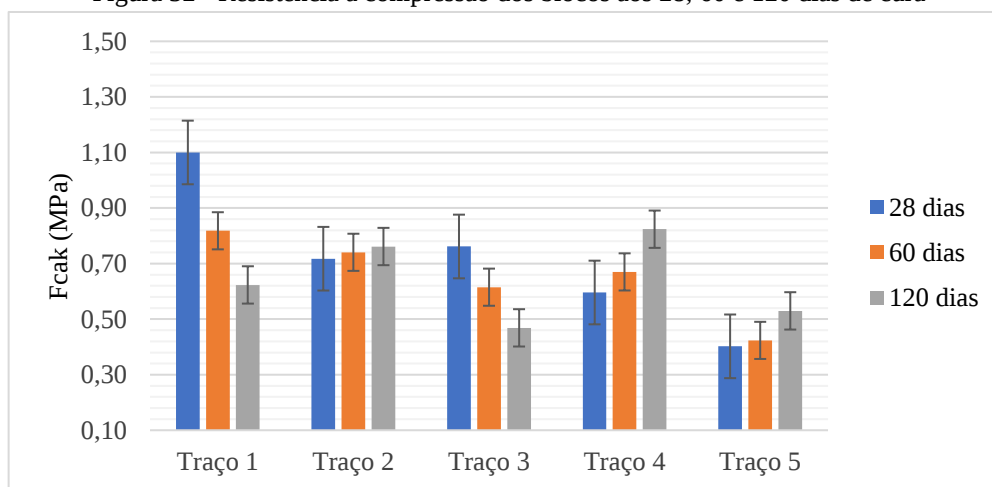
Figura 31 - Resistência à compressão aos 120 dias de cura



Fonte: Autora

Na Figura 32 é apresentada a resistência à compressão dos blocos de adobe nos diferentes traços ao longo do tempo de cura.

Figura 32 - Resistência à compressão dos blocos aos 28, 60 e 120 dias de cura



Fonte: Autora

O aumento observado na resistência à compressão dos blocos de adobe nos traços 2, 4 e 5 pode estar relacionada à criação de uma espécie de "barreira" dentro dos blocos. Isso ocorre devido ao aumento do atrito e do fortalecimento da ligação entre a casca de arroz e o solo. Essa interação entre os materiais resulta em uma resistência maior quando uma força é aplicada sobre os blocos, pois a força de bloqueio gerada pelo atrito e pela ligação mais forte evita que as partículas se movam facilmente umas em relação às outras. Essa combinação de fatores leva a uma resistência aumentada nos blocos de adobe (Ige; Danso, 2022).

A casca de arroz também possui característica de alta porosidade, sendo capaz de diminuir a adesão da argila encontrada no solo. Isso resulta na redução do atrito entre os componentes do solo e na formação de espaços entre as partículas do solo, culminando na melhoria da resistência do bloco (Oskouei et al., 2017). Por outro lado, pode-se deduzir que a combinação do aditivo (óleo de cozinha usado) diminui as propriedades de resistências mecânicas no início do experimento, mas melhoraram ao longo da cura, fechando vazios existentes nos blocos (Eires et al., 2017).

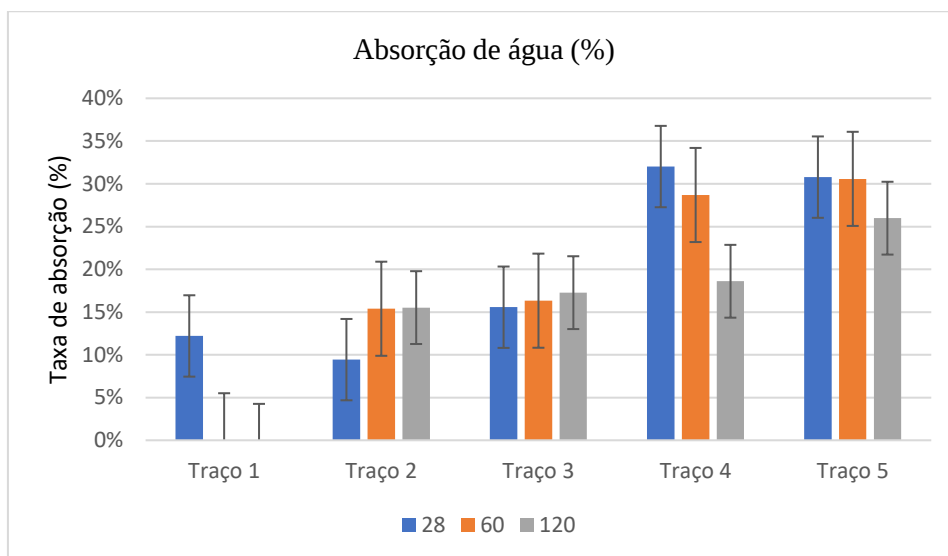
As fibras possuem características únicas e diferem seu comportamento. Em um estudo relacionado com fibras e folhas de neen, ao adicionar 2% de fibra em peso de solo teve a resistência com valor 6,35 MPa, comparado com 4% de folhas, onde houve uma redução da resistência em relação bloco contendo apenas solo, de 4,69 MPa para 4,09 MPa (Babé et al., 2021). O comportamento das fibras na matriz de solo pode ser explicado pela fraqueza de ligação da fibra e do solo, que quando adicionada em quantidades inadequadas, baixa resistência da fibra, além do formato e tamanho, isso se traduz em uma diminuição da densidade do material resultante uma vez que as partículas vegetais tendem a ocupar mais espaço em relação ao seu peso, quando comparadas a materiais mais densos (Babé et al., 2021; Laborel-Préneron et al., 2017). Portanto, pode-se concluir, com base no estudo, que a adição de 0,6% de casca de arroz na matriz do solo reduz a resistência à compressão, indicando que o uso dessa porcentagem não é adequado.

4.2.3 Absorção de água dos blocos de adobe

Os dados sobre a absorção de água dos blocos de adobe estabilizados com casca de arroz e óleo de cozinha usado estão representados na Figura 33. Verifica-se que os blocos do traço 1, compostos apenas por solo, exibiram uma taxa de absorção de 12%, mas não suportaram os testes de 60 e 120 dias. A taxa de absorção de água dos blocos do traço 4, que inclui 0,3% de casca de arroz e 1% de óleo de cozinha, foi menor em comparação com os demais traços. Essa taxa diminuiu de 32,02% aos 28 dias para 18,60% aos 120 dias de cura, conforme a idade das amostras.

Este comportamento indica que quanto maior o teor de casca de arroz, menor será a resistência dos blocos de adobe à água, o que também foi observado em um estudo anterior utilizando casca de arroz combinado com cal na produção de blocos de adobe (Ige; Danso, 2022).

Figura 33 - Resumo dos valores de absorção de água dos blocos



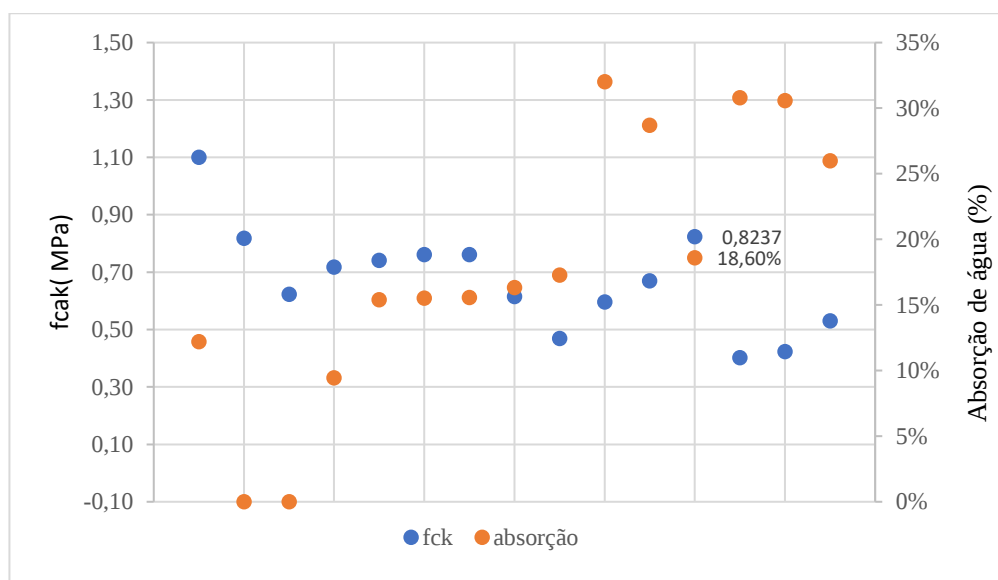
Fonte: Autora

Alguns estudos documentaram que a incorporação de fibras pode resultar em aprimoramento das propriedades dos blocos de adobe. O uso de fibras apresentou melhoria na resistência à água, à permeabilidade ao vapor d'água e na capilaridade, o que resulta em um aumento da durabilidade, tanto em relação à resistência à água quanto à condutividade térmica das construções (Babé et al., 2021; Laborel-Préneron; Magniont; Aubert, 2018).

Diferentemente, a alta taxa de absorção de água nos blocos de solo reforçados com fibras pode ser associada à presença de celulose, que é hidrofílica. Esse fenômeno também foi observado nos blocos de traços 2 e 3, com aumentos de 69,64% e 9,19%, respectivamente. Além disso, a existência de poros nesses materiais também contribui como um fator adicional. Essa ocorrência foi observada em blocos reforçados com fibras similares a casca de arroz, onde a absorção aumentou, levando ao aumento de volume das fibras (Muhammad et al., 2020).

A incorporação de óleos e gorduras também tende a melhorar o desempenho em termos de absorção capilar, embora possa levar à diminuição de outras propriedades, como a resistência mecânica, como observado nos blocos de traços 3 e 5, que apresentaram diminuição da absorção de água, mas também diminuiu a resistência mecânica. No entanto, a utilização de uma proporção adequada de óleo pode resultar em um aumento da resistência mecânica, devido à consequente redução da porosidade no estado endurecido do bloco (Eires et al., 2017). A Figura 34, ilustra a tendência dos valores de resistência a compressão e absorção de água ao longo do tempo de cura.

Figura 34 - Gráfico dos resultados de f_{ck} e absorção de água dos blocos



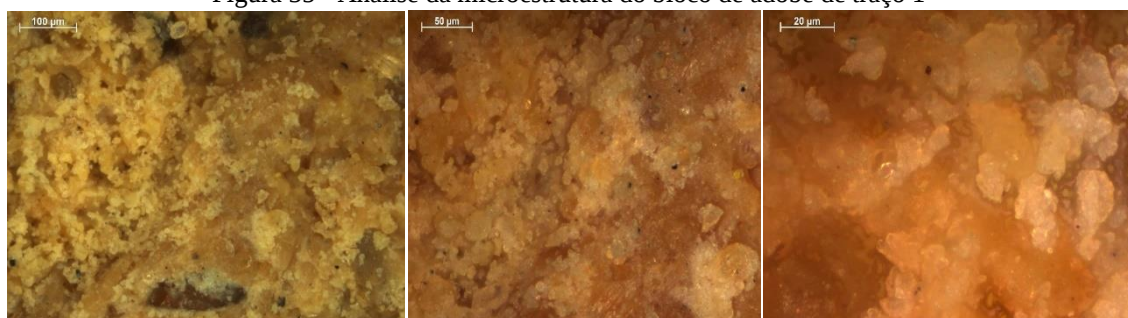
Fonte: Autora

Na Figura 34, é possível observar que o traço 4, composto por 0,3% de casca de arroz, 1% de óleo de cozinha usado e sem areia na mistura do solo, apresentou o melhor desempenho mecânico e absorção de água. Após 120 dias de cura, obteve-se uma resistência mecânica de 0,82 MPa e uma taxa de absorção de água de 18,60 %.

4.2.4 Análise Microestrutural

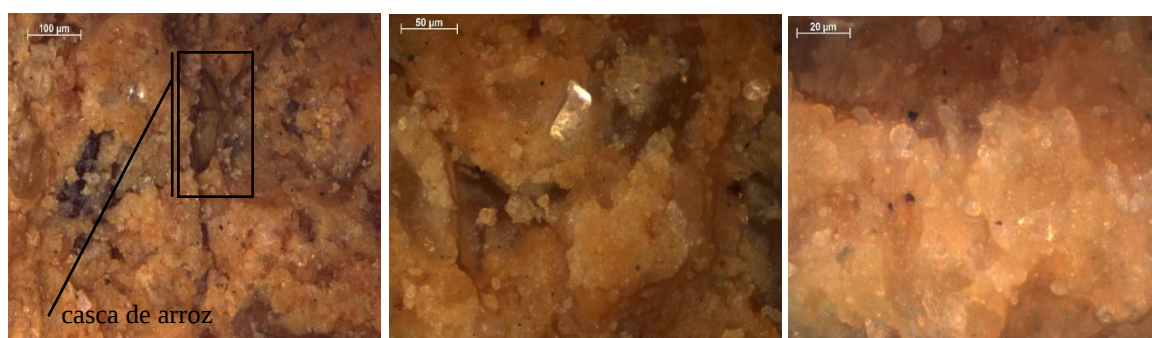
A análise da microestrutura das amostras dos blocos de adobe aos 60 dias de cura foi realizada sob campo de luz claro e expressou o processo de aderência da casca de arroz ao solo. As imagens das amostras dos traços 1, 2 e 3 são apresentadas em diferentes escalas, nas Figuras 35, 36 e 37, respectivamente.

Figura 35 - Análise da microestrutura do bloco de adobe de traço 1



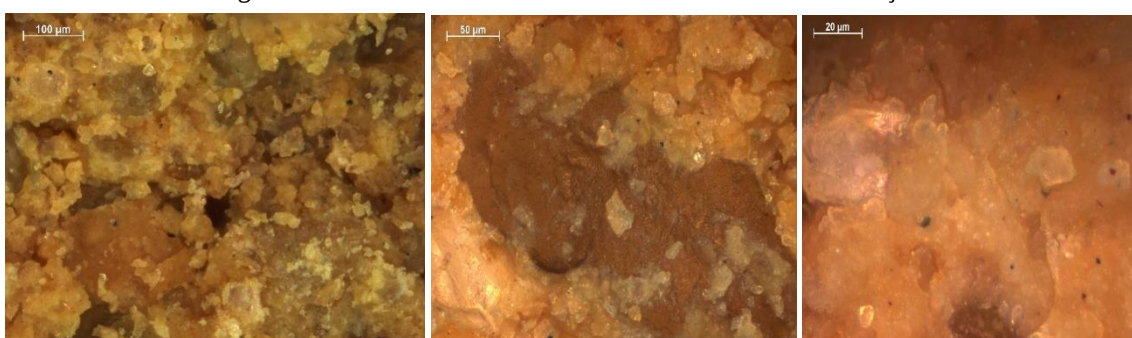
Fonte: Autora

Figura 36 - Análise de microestrutura do bloco de adobe de traço 2



Fonte: Autora

Figura 37 - Análise de microestrutura do bloco de adobe do traço 3



Fonte: Autora

Com base nestas imagens da microestrutura dos blocos de adobe, nos diferentes traços, foi possível identificar a presença de vazios no traço 1, sendo este um traço composto apenas por solo, sem qualquer aditivo. No caso do traço 2, é possível observar a presença da casca de arroz preenchendo alguns espaços vazios, exibindo uma distribuição irregular. As características da casca de arroz, incluindo sua porosidade, desempenharam um papel crucial na melhoria da capacidade de resistência à compressão nas amostras de adobe. Isso é claramente ilustrado no estudo realizado por Ige e Danso (2022), no qual eles empregaram uma combinação de casca de arroz e cal na mistura de blocos de adobe. Essas características podem explicar o aumento do desempenho mecânico deste traço ao longo do tempo, que aumentou de 0,71 MPa para 0,76 MPa. No bloco de adobe de traço 3, que é constituído por maior proporção de casca de arroz, foi possível observar aumento de vazios, o que resultou no incremento maior da absorção de água e na diminuição da resistência mecânica. Em todos os traços observadas não houve o aparecimento de fungos nas amostras contendo casca de arroz, embora ainda apresentasse umidade aos 28 dias de cura.

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos neste estudo sobre as propriedades físico-mecânicas de blocos de adobe estabilizados com casca de arroz e óleo de cozinha usado, foram deduzidas as seguintes conclusões:

1. A resistência máxima dos blocos de adobe à compressão foi obtida com a composição de 0,3% de casca de arroz e 1% de óleo vegetal e foi de 0,82 MPa após 120 dias de cura, mas não atende às especificações da norma NBR 16814 (ABNT, 2020).
2. A adição de casca de arroz contribuiu para o aumento da resistência dos blocos de adobe ao longo do tempo de cura, enquanto o óleo vegetal melhorou a plasticidade do solo. O aumento da plasticidade foi importante, pois não foram observadas fissuras na superfície das amostras dos blocos de adobe contendo os aditivos. Porém, parte das amostras sem estabilização (apenas solo na composição) apresentou colapso aos 7 dias de cura. Os blocos de adobe sem aditivos não resistiram aos testes de absorção de água após 60 e 120 dias de cura.
3. A incorporação de casca de arroz na porcentagem 0,3% resultou em um aumento moderado da resistência dos blocos de adobe, porém, devido ao pequeno tamanho das partículas, a resistência de ligação entre os blocos não alcançou níveis significativos. A melhor resistência encontrada ficou 30,22% abaixo do exigível pela NBR 16814/2020.
4. A inclusão de areia na composição dos blocos de adobe nos traços 2 e 3 não melhorou de forma significativa a resistência mecânica em comparação com os traços que não utilizaram areia. A adição de areia fina na composição contribuiu apenas para reduzir a deformação dos blocos de adobe durante os ensaios. Os traços 2 e 3, contendo areia, aumentaram absorção de água, mas atenderam às Normas. O óleo vegetal contribui para diminuição de absorção de água dos traços 4 e 5, sem adição de areia, que ainda ficaram com níveis altos de absorção. O traço 5 não atendeu à Norma para absorção.
5. As imagens geradas na análise microestrutural permitiram observar a interação da casca de arroz na matriz de solo. A proporção de 0,3% de casca de arroz (traço 2) resultou em melhora na aderência do material às partículas de argila presentes no solo, causando diminuição da porosidade.
6. O estudo demonstrou que a combinação da casca de arroz e óleo de cozinha usado, melhorou as propriedades mecânicas e absorção de água do traço 4, com porcentagem de 0,3%. Porém diminui as propriedades com traço de 0,6% de casca de arroz. É

necessário estudar as proporções adequadas para as combinação de componentes na produção de blocos de adobe.

7. O traço que mais satisfaz aos requisitos das Normas, em conjunto, é o traço 4. Porém, recomenda-se aprimorar este traço adequando o solo com quantidade maior de argila, para que melhore a propriedade resistência mecânica e atenda à Norma 16814/2020.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDULLA, K. F.; CUNNINGHAM, L. S.; GILLIE, M. Experimental Study on the Mechanical Properties of Straw Fiber–Reinforced Adobe Masonry. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 32, n. 11, nov. 2020.
- ALDAWOODI, B.; SABRI, S.; WIS, A. Optimum Calcination Condition of Waste Stabilized Adobe for Alkali Activated High Volume Adobe-Slag Binder Cured at Room Temperature. **Journal of Renewable Materials**, v. 10, n. 5, p. 1269–1285, 2022.
- ALIAKBARI, R.; MOHAMMAD, G.; NEEKZAD, N.; KOWSARI, E.; RAMAKRISHNA, S.; MEHRALI, M.; MARFAVI, Y. High value add bio-based low-carbon materials: Conversion processes and circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 293, p. 126101, 2021.
- ALNAHHAL, A. M.; ALENGARAM, U. J.; YUSOFF, S.; SINGH, R.; RADWAN, M. K. H.; DEBOUCHA, W. Synthesis of sustainable lightweight foamed concrete using palm oil fuel ash as a cement replacement material. **Journal of Building Engineering**, v. 35, n. March 2020, p. 102047, 2021.
- ANASTASIADIS, K.; BLOM, J.; BUYLE, M.; AUDENAERT, A. Translating the circular economy to bridge construction: Lessons learnt from a critical literature review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 117, n. September 2019, p. 109522, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10836**: Bloco de solo cimento: Sem função estrutural, análise dimensional, determinação de resistência a compressão e absorção de água: Métodos de Ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15270-1**: Componentes cerâmicos - blocos e tijolos para alvenaria - parte 1: requisitos: ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16814**: Adobe: Requisitos e Métodos de Ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6459**: solo: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6502**: Solos e Rochas: Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7180**: solo: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7181**: solo: análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7182**: solo: ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

BABÉ, C.; KIDMO, D. K.; TOM, A.; MVONDO, R. R. N.; KOLA, B.; JONGYANG, N. Effect of neem (*Azadirachta Indica*) fibers on mechanical, thermal and durability properties of adobe bricks. **Energy Reports**, v. 7, n. 5, p. 686–698, 2021.

BAMIGBOYE, O.; BASSEY, D.; OLUKANNI, D.; NGENE, B.; ADEGOKE, D.; DETOYAN, A.; KAREEM, M.A.; ENABULELE, D.; NWORGU, T. Waste materials in highway applications: An overview on generation and utilization implications on sustainability. **Journal of Cleaner Production**, v. 283, p. 124581, 2021.

BARNES, G. **Mecânica dos Solos - Princípios e Práticas**, 3ª ed. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2016. E-book. ISBN 9788595155084. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595155084/>. Acesso em: 12 abril de 2023.

BATTEGAZZORE, D.; JENNY ALONGI, J.; DURACCIO, D.; FRACHE, F. Reuse and Valorisation of Hemp Fibres and Rice Husk Particles for Fire Resistant Fibreboards and Particleboards. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 26, n. 9, p. 3731–3744, 1 set. 2018.

BAYIZITLIOĞLU, B. Conservation and Maintenance of Earth Constructions: Yesterday and Today. **Historic Environment: Policy and Practice**, v. 8, n. 4, p. 323–354, 2 out. 2017.

BELLOTE, A.; ANDRADE, G.; MOLINARI, H.; ROCHA, J.; SILVA, M.; STEINMETZ, R.; FAVARO, S. **Energia limpa e acessível Biomassa e sua participação na matriz energética brasileira**. 2020.

BLANK, L.; NARANCIC, T.; MAMPEL, J.; TISO, T.; O'CONNOR, K. **Biotechnological upcycling of plastic waste and other non-conventional feedstocks in a circular economy**. Current Opinion in Biotechnology. Elsevier Ltd. 1 abr. 2020.

BRASIL. **Lei n.º 12.305**, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei n.º 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União: Brasília, 03 de ago. de 2010.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente - MMA. **Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos-SINIR**. Disponível em: <https://sinir.gov.br/informacoes/tipos-de-residuos/residuos-agrossilvopastoris/>. Acesso em: 15 de março de 2023.

BRIDGENS, B.; POWELL, M.; FARMER, G.; WALSH, C.; REED, E.; ROYAPOOR, M.; GOSLING, P.; HALL, J.; HEIDRICH, O. Creative upcycling: Reconnecting people, materials and place through making. **Journal of Cleaner Production**, v. 189, p. 145–154, 2018.

CALATAN, G.; HEGY, A.; DICO, C.; MIRCEA, C. Experimental Research on the Recyclability of the Clay Material Used in the Fabrication of Adobe Bricks Type Masonry Units. **Procedia Engineering**, v. 181, p. 363–369, 2017.

CALATAN, G.; HEGYI, A.; DICO, C.; SZILAGYI, H.; ALATAN, G. Opportunities regarding the use of adobe-bricks within contemporary architecture. *Procedia Manufacturing*. **Anais**. Elsevier, 2020.

CAPORALE, A.; PARISI, F.; DOMENICO, A.; RAIMONDO, L.; PROTA, A. Critical surfaces for adobe masonry: Micromechanical approach. **Composites Part B: Engineering**, v. 56, p. 790–796, 2014.

CONTRERAS-LISPERGUER, R.; MUÑOZ-CERÓN, E.; AGUILERA, J.; DE LA CASA, J. A set of principles for applying Circular Economy to the PV industry: Modeling a closed-loop material cycle system for crystalline photovoltaic panels. **Sustainable Production and Consumption**, v. 28, p. 164–179, 2021.

DANSO, H. Improving Water Resistance of Compressed Earth Blocks Enhanced with Different Natural Fibres. **The Open Construction and Building Technology Journal**, v. 11, n. 1, p. 433–440, 29 dez. 2017.

DANSO, H.; MARTINSON, B.; ALIA, M.; MANTA, C. Performance characteristics of enhanced soil blocks: A quantitative review. **Building Research and Information**, v. 43, n. 2, p. 253–262, 2015.

DAVIS, M. L.; MASTEN, S. J. **Princípios da Engenharia Ambiental**. 3ª ed. Porto Alegre. Bookman, 2016.

EIRES, R.; CAMÕES, A.; JALALI, S. Enhancing water resistance of earthen buildings with quicklime and oil. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 3281–3292, 2017.

EMF. Towards a Circular Economy: Business Rationale for an Accelerated Transition. **Ellen MacArthur Foundation (EMF)**, p. 20, 2015.

FIGUEIREDO, N.; PEREIRA, A.; HORÁCIO, G.; AZEVEDO, O. **Arquitetura em terra, adobe e taipa e a linguagem moderna**. 2021. Dissertação (Mestrado em Arquitetura). Faculdade de Arquitetura e Artes de Lisboa da Universidade. Lisboa. 2021.

FRATINI, F.; PECCHIONI, E.; ROVERO, L.; TONIETTI, U. The earth in the architecture of the historical centre of Lamezia Terme (Italy): Characterization for restoration. **Applied Clay Science**, v. 53, n. 3, p. 509–516, set. 2011.

GEBREMARIAM, A.; VAHIDI, A.; DI MAIO, F.; MORENO-JUEZ, J.; VEGAS-RAMIRO, I.; ŁAGOS, A.; MRÓZ, R.; REM, P. Comprehensive study on the most sustainable concrete design made of recycled concrete, glass and mineral wool from C&D wastes. **Construction and Building Materials**, v. 273, p. 121697, 2021.

GIROUDON, M.; LABOREL-PRÉNERON, A.; AUBERT, J. E.; MAGNIONT, C. Comparison of barley and straws as bioaggregates in earth bricks. **Construction and Building Materials**, v. 202, p. 254–265, 2019.

HEIN, L. R.; OLIVEIRA, J. A.; CAMPOS, K. A.; CALTABIANO, P. C. R. O. Extended depth from focus reconstruction using NIH ImageJ plugins: Quality and resolution of elevation maps. **Microscopy Research and Technique**, v. 75, n. 11, p. 1593–1607, nov. 2012.

HORODYTSKA, O.; KIRITSIS, D.; FULLANA, A. Upcycling of printed plastic films: LCA analysis and effects on the circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 268, p. 1–12, 2020.

IGE, O.; DANSO, H. Experimental Characterization of Adobe Bricks Stabilized with Rice Husk and Lime for Sustainable Construction. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 34, n. 2, p. 1–11, 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Levantamento da Produção Agrícola Nacional**. São Paulo. Disponível em: https://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Levantamento_Sistematico_da_Producao_Agricola Acesso em: 15 de mar. de 2023.

JAMIL, Y.; NASLA, S.; BOUGTAIB, K.; GUERAOU, K.; CHERRAJ, M. The effect of the sisal fiber content of agave and/or lime on the mechanical and thermal characterizations of soil-based compressed earth blocks from the province of rehamna in morocco. **JP Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 24, n. 2, p. 207–226, 2021.

KNAPPETT, J. A.; CRAIG, RF **Craig | Mecânica dos Solos**, 8ª ed. São Paulo: Grupo GEN, 2014. *E-book*. ISBN 978-85-216-2703-6. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-2703-6/>. Acesso em: 12 de abril de 2023.

LABOREL-PRÉNERON, A.; AUBERT, JE.; MAGNIONT, C.; MAILLARD, P.; POIRIER, C. Effect of Plant Aggregates on Mechanical Properties of Earth Bricks. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 12, dez. 2017.

LABOREL-PRÉNERON, A.; GIROUDON, M.; AUBERT, JE, MAGNIONT, C.; FARIA, P. Experimental assessment of bio-based earth bricks durability. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 660, n. 1, 2019.

LOPES, C.M.N.; MENDES, V. F.; GARCIA, D. R.; MENDES, J. C. Residues in cement-based composites: Occurrence mapping in Brazil. **Case Studies in Construction Materials**, v. 18, 1 jul. 2023.

LOSINI, A. E.; GRILLET, A. C.; BELLOTTO, M.; WOLOSZYN, M.; DOTELLI, G. Natural additives and biopolymers for raw earth construction stabilization: A review. **Construction and Building Materials**. v. 304, n. 8, p. 124507, 2021.

MADURWAR, M. V.; RALEGAONKAR, R. V.; MANDAVGANE, S. A. Application of agro-waste for sustainable construction materials: A review. **Construction and Building Materials**, v. 38, p. 872–878, 2013.

MANUAL BÁSICO DE ESTRADAS E RODOVIAS VICINAIS-Volume I. **Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER/SP)**, v. 1, 2012.

MARQUES, B.; TADEU, A.; ALMEIDA, J.; ANTÓNIO, J. Experimental characterisation of cement-based composites with rice husk. **International Journal of Design and Nature and Ecodynamics**, v. 14, n. 2, p. 147–153, 2019.

MOAYEDI, H.; AGHEL, B.; ABDULLAHI, M. M.; NGUYEN, H.; RASHID, A. S. A. Applications of rice husk ash as green and sustainable biomass. **Journal of Cleaner Production**, v. 237, p. 117851, 2019.

MUHAMMAD, M. A. S.; KAZMI, S. M. S.; MUNIR, M. J. Experimental study of fibre-reinforced interlocking mud bricks under compressive test. **Proceedings of Institution of Civil Engineers: Construction Materials**, v. 173, n. 4, p. 181–189, 2020.

- OSKOU EI, A.; MOHAMMAD, A.; MADADIPOUR, M. Experimental investigation on mud bricks reinforced with natural additives under compressive and tensile tests. **Construction and Building Materials**, v. 142, p. 137–147, 1 jul. 2017.
- PALUMBO, M.; MCGREGOR, F.; HEATH, A.; WALKER, P. The influence of two crop by-products on the hygrothermal properties of earth plasters. **Building and Environment**, v. 105, p. 245–252, 2016.
- RAMBO, M. K. D.; ALEXANDRE, G. P.; RAMBO, M. C. D.; ALVES, A. R.; GARCIA, W. T.; BARUQUE, E. Characterization of biomasses from the north and northeast regions of Brazil for processes in biorefineries. **Food Science and Technology (Brazil)**, v. 35, n. 4, p. 605–611, 1 out. 2015.
- RAMOS, A.; BRIGA-SÁ, A.; PEREIRA, S.; CORREIA, M.; PINTO, J.; BENTES, I.; TEIXEIRA, C. A. Thermal performance and life cycle assessment of corn cob particleboards. **Journal of Building Engineering**, v. 44, n. July, p. 102998, 2021.
- RAUTRAY, P.; ROY, R.; MATHEW, D.J.; EISENBART, B. Bio-brick - Development of sustainable and cost effective building material. **Proceedings of the International Conference on Engineering Design, ICED**, v. 2019-Augus, n. AUGUST, p. 3171–3180, 2019.
- SÃO PAULO, Prefeitura Municipal de Santa Cruz do Rio Pardo. **Dados sobre os aspectos econômicos do município de Santa Cruz do Rio Pardo**, São Paulo, 2021. Disponível em: <https://www.santacruzdoripardo.sp.gov.br/perfil-socio-economico>. Acesso em 17 de abril de 2021.
- SERRANO, S.; BARRENECHE, C.; CABEZA, L. F. Use of by-products as additives in adobe bricks: Mechanical properties characterisation. **Construction and Building Materials**, v. 108, p. 105–111, 2016.
- SINGH, J.; SUNG, K.; COOPER, T.; WEST, K.; MONT, O. Challenges and opportunities for scaling up upcycling businesses – The case of textile and wood upcycling businesses in the UK. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 150, n. 12, p. 104439, 2019.
- SORMUNEN, P.; KÄRKI, T. Recycled construction and demolition waste as a possible source of materials for composite manufacturing. **Journal of Building Engineering**, v. 24, n. August 2018, p. 100742, 2019.
- TANG, Z.; LI, W.; TAM, V. W. Y.; XUE, C. Advanced progress in recycling municipal and construction solid wastes for manufacturing sustainable construction materials. **Resources, Conservation and Recycling**: X, v. 6, n. 3, p. 100036, 2020.
- TORGAL, F. P. S. Construção em Terra: o Passado, o presente e o Futuro. **Revista arte e construção**, Portugal, p. 01– 09, 2009.
- VATANI OSKOU EI, A.; AFZALI, M.; MADADIPOUR, M. Experimental investigation on mud bricks reinforced with natural additives under compressive and tensile tests. **Construction and Building Materials**, v. 142, p. 137–147, 2017.
- VAZ JÚNIOR, S. **Aproveitamento de resíduos agroindustriais**: Uma abordagem sustentável. 2020. Disponível em: <www.embrapa.br/Acesso em 20/01/2023.

VELASCO-AQUINO, A. A.; ESPUNA-MUJICA, J. A.; PEREZ-SANCHEZ, J. F.; ZUÑIGA-LEAL, C.; PALACIO-PEREZ, A.; SUAREZ-DOMINGUEZ, E. J. Compressed earth block reinforced with coconut fibers and stabilized with aloe vera and lime. **Journal of Engineering, Design and Technology**, v. 19, n. 3, p. 795–807, 2020.

VENKATESH, K.; JEELANI, S. H.; BANO, S.; GANAPATHY, C. P.; IMPA, K. A.; RAMYA, H. Net al. Investigating compressive strength of building blocks for varying content of marble dust and rice husk. **Materials Today: Proceedings**, v. 69, p. 1229–1232, 1 jan. 2022.

WEETMAN, C., **Economia circular: conceitos e estratégias para fazer negócios de forma mais inteligente, sustentável e lucrativa** / Catherine Weetman; tradução Afonso Celso da Cunha Serra. -- 1. ed. -- São Paulo: Autêntica Business, 2019.